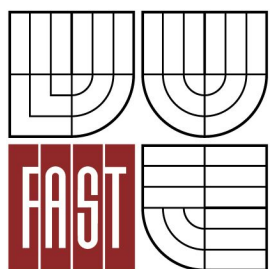




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

OVĚŘENÍ KVALITY POVRCHOVÉ VRSTVY BETONU POMOCÍ ODTRHOVÉ ZKOUŠKY

THE VERIFICATION OF DURABILITY OF SURFACE LAYER BY PULL-OFF TESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

HEDVIKA FUJAČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Hedvika Fujačková
Název	Ověření kvality povrchové vrstvy betonu pomocí odtrhové zkoušky
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Dalibor Kocáb
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Schmidt, P. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.

Anton, O. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2002.

Collepari, M.: Moderní beton.

Pytlík, P.: Technologie betonu.

Neville, A.M.: Properties of concrete.

Newman, J.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Odborné články pojednávající o zadané problematice.

Všechny platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN EN 206, ČSN 73 1318, ČSN EN 1542, ČSN EN 1766, řada ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.

Zásady pro vypracování

Teoretická část: Rešerše pramenů – beton a jeho vlastnosti, především pevnost v tahu.

Problematika hodnocení trvanlivosti betonu, zejména s přihlédnutím k hodnocení kvality povrchové vrstvy betonu. Popis vybraných zkušebních metod.

Praktická část: Zpracování plánu experimentu – sledování tahových pevností povrchové vrstvy betonu různého složení (vliv zvyšování dávky cementu a dávky plastifikační přísady na zkoumanou charakteristiku betonu). Výroba zkušebních těles – kvádrů 300×300×150 mm. Provedení a vyhodnocení zkoušky pevnosti v tahu povrchové vrstvy betonu. Tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek, vyhodnocení výsledků zkoušek. Na základě zjištěných výsledků učinit adekvátní závěr.

Práci se zkušebními zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
Ing. Dalibor Kocáb
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Teoretická časť tejto bakalárskej práce definuje základné vlastnosti, delenie a použitie jednotlivých zložiek betónu a zaoberá sa vlastnosťami čerstvého a zatvrdnutého betónu, hlavne pevnosťou v ťahu. Ďalej sa venuje problematike hodnotenia trvanlivosti betónu, ktorá je priamo závislá od kvality povrchovej vrstvy.

Experimentálna časť práce sa sústreďuje na realizáciu odtrhovej skúšky a pozorovanie ťahových pevností povrchových vrstiev betónov, ktoré boli zhotovené podľa rôznych receptúr. Práca porovnáva ako namerané výsledky korešpondujú s výsledkami z iných publikovaných meraní.

Kľúčové slová

Betón, cement, prísady, pevnosť v ťahu, trvanlivosť, odtrhová skúška, povrchová vrstva betónu, vodný súčiniteľ

Abstract

The theoretical part of this bachelor's thesis defines the basic properties, categorization, and use of the individual components of concrete and presents the properties of fresh and hardened concrete, especially the tensile strength. Furthermore, the thesis addresses the problem of durability assessment of concrete, which depends directly on the quality of the surface layer.

The experimental part of the thesis focuses on executing of a pull-off test and examines the surface layer tensile strengths of various concrete mix designs. The thesis examines how the results of the measurements correspond with other published results.

Keywords

Concrete, cement, additives, tensile strength, durability, pull-off test, surface layer of concrete, water-cement ratio

Bibliografická citácia VŠKP

Hedvika Fujačková *Ověření kvality povrchové vrstvy betonu pomocí odtrhové zkoušky*.
Brno, 2015. 67 s., 14 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta
stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb

Vyhlásenie

Vyhlasujem, že som bakalársku prácu spracovala samostatne a že som uviedla všetky použité informačné zdroje.

V Brne dňa 26. 05. 2015

.....

podpis autora

VYHLÁSENIE O ZHODE TLAČENEJ A ELEKTRONICKEJ FORMY VŠKP

Vyhlasujem, že elektronická forma odovzdanej práce je zhodná s odovzdanou tlačенou formou.

V Brne dňa 26. 05. 2015

meno a priezvisko študenta

PodĎakovanie

Rada by som sa poĎakovala svojmu vedúcemu práce Ing. Daliborovi Kocábovi, za odborné vedenie, cenné rady a pripomienky, ktoré mi poskytoval v priebehu tvorby bakalárskej práce.

Ďalej by som sa chcela poĎakovať svojim rodičom a priateľom, ktorí ma podporovali a boli mi oporou v celom priebehu štúdia.

Táto bakalárska práca bola vypracovaná za podpory projektu GAČR 13-18870S „Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu“.

Brne dňa 26. 5. 2015

.....

podpis autora

Obsah

1 ÚVOD.....	11
2 CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE	12
3 TEORETICKÁ ČASŤ	13
3.1 Betón a jeho zložky	13
3.1.1 Kamenivo.....	14
3.1.2 Cement.....	16
3.1.3 Voda	18
3.1.4 Prísady	19
3.1.5 Prímesi.....	22
3.2 Vlastnosti betónu	23
3.2.1 Vlastnosti čerstvého betónu.....	24
3.2.2 Vlastnosti zatvrdnutého betónu.....	27
3.2.3 Tepelné vlastnosti betónu	30
3.3 Pevnosť betónu.....	31
3.3.1 Pevnosť v prostom ťahu	32
3.3.2 Pevnosť v priečnom ťahu	33
3.3.3 Pevnosť ťahu ohybom	35
3.4 Vodný súčiniteľ	37
3.5 Trvanlivosť betónu	38
3.5.1 Povrchová vrstva betónu	38
3.5.2 Permeabilita	39
3.5.3 Možnosti hodnotenia priepustnosti	40
3.5.4 Korózia	42
3.5.5 Opotrebenie.....	47
3.6. Odtrhová skúška	48
4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	51
4.1 Výroba čerstvého betónu	51
4.2 Mechanizmy a pomocné prostriedky.....	53
4.3 Priebeh skúšky.....	53
4.4 Spracovanie výsledkov	54
5 ZÁVER	60
6 ZOZNAM POUŽITÝCH NORIEM, LITERATÚRY A WWW ODKAZOV	61
7 ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV	64
8 ZOZNAM OBRÁZKOV, TABULIEK, GRAFOV, VZORCOV, PRÍLOH.....	65

8.1 Zoznam obrázkov	65
8.2 Zoznam tabuliek	66
8.3 Zoznam grafov	66
8.4 Zoznam vzorcov	66
8.5 Zoznam príloh	67

1 ÚVOD

Betón je umelý kameň, ktorý je najrozšírenejší a najčastejšie používaný stavebný materiál súčasnosti. Vo vyspelých krajinách sveta predstavuje viac ako dve tretiny objemu výroby a spotreby všetkých stavebných materiálov. Za podstatné výhody vo využívaní betónu ako konštrukčného materiálu sa považujú jeho ľahká formovateľnosť, dostatočná pevnosť a trvanlivosť, nehorľavosť, odolnosť proti poveternostným vplyvom a mechanickému opotrebeniu. Betón má dobrú tepelno-akumulačnú a zvuko-izolačnú schopnosť. Možno ho považovať za plne recyklovateľný stavebný materiál. Prevláda názor, že aj z ekonomického hľadiska je betón ako konštrukčný materiál pomerne lacný a možno ho vyrobiť z lokálnych surovín. V súčasnej dobe sú kladené čoraz väčšie nároky na trvanlivosť betónu [13].

2 CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

V súčasnosti existuje niekoľko spôsobov ako hodnotiť trvanlivosť betónu. Cieľom bakalárskej práce je overiť, či možno trvanlivosť, čím sa rozumie kvalita povrchovej vrstvy, hodnotiť odtrhovou skúškou, ktorá je v podstate formou простého ťahu. Spočiatku vidno, že táto možnosť tu je, ale na základe prevedených experimentov, vyhodnotenia a porovnania s inými skúškami sa odtrhy javia ako nie príliš vhodné.

3 TEORETICKÁ ČASŤ

Teoretická časť práce sa zaoberá jednotlivými zložkami, ktoré tvoria betón. Popisuje charakteristické vlastnosti čerstvého a zatvrdnutého betónu. Pozornosť je sústredená predovšetkým na ťahovú pevnosť. Ďalej sa venuje problematike trvanlivosti a skúšobným metódam, ktorými možno trvanlivosť resp. kvalitu povrchovej vrstvy betónu hodnotiť. V závere detailne popisuje odtrhovú skúšku a jej priebeh.

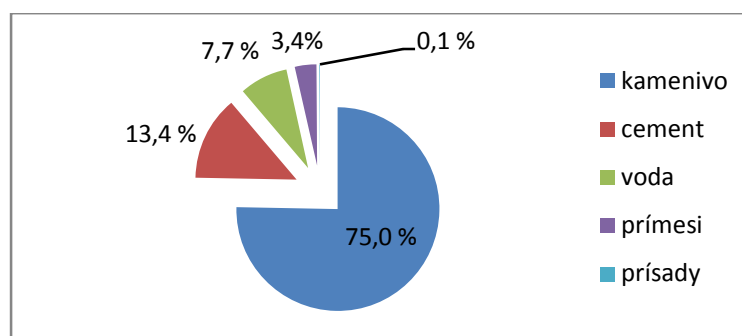
3.1 Betón a jeho zložky

Betón je umelý kompozitný stavebný materiál, ktorý sa skladá zo spojiva, plniva, vody a väčšinou aj prísad a prímiesí. Konečné vlastnosti betónu sa dosahujú hydratáciou cementu. Zloženie betónu nesmie obsahovať škodlivé látky v takom množstve, ktoré by ohrozilo jeho trvanlivosť alebo bolo príčinou korózie výstuže, a musí byť vhodné pre uvažované použitie betónu [1, 2].

Do betónov sa používajú vhodné organické alebo anorganické spojivá a najčastejšie sa pridávajú rozpustené vo vode. Podľa prostredia, v ktorom tuhnú, rozdeľujeme spojivá na hydraulické (cement) a vzdušné (sadra, vápno).

Plnivom býva prevažne anorganický zrnitý materiál, ktorý sa všeobecne označuje ako kamenivo do betónu. Plnivá organického pôvodu, ako sú drevené vláknité dosky, triesky, piliny či polystyrén, sa používajú len veľmi zriedkavo [1].

Jeho vlastnosti sú ovplyvnené pomerom zložiek. Zvláštne vlastnosti betónu sa dosahujú pridaním prísad a prímiesí.



Graf 3.1. Hmotnostný podiel jednotlivých zložiek betónu [3]

3.1.1 Kamenivo

Kamenivom na stavebné účely sa rozumie zrnitý (sypký) anorganický materiál s rôznou veľkosťou zrna maximálne však do 63 mm. Jeho hlavnou funkciou v betóne je vytvorenie pevnej a tlakovo odolnej kostry (skeletu) s predpísanou, spravidla čo najmenšou medzerovitosťou, ktorá vzniká vzájomným zaklivením jednotlivých zrn. Kamenivo tvorí 70 až 80 % objemu betónu. Mechanicko-fyzikálne vlastnosti sú ovplyvnené pôvodom kameniva, resp. jeho mineralogickým zložením [1, 2].

Základné požiadavky na kamenivo sú pevnosť, objemová hmotnosť, trvanlivosť a nenasiakavosť. Škodlivinami, resp. nevhodnými súčiastkami kameniva do betónu, sú hlavne tvarovo nevhodné, nekubické zrná (tj. zrná ploché alebo pretiahnuté, ktorých podiel dĺžky a hrúbky je väčší ako 3), zvýšený obsah jemných častíc (pod 0,063 mm) alebo humusovitých látok, látky obsahujúce zlúčeniny síry a zrná tvorené amorfným oxidom kremičitým, ktoré v spojení s cementom môžu spôsobiť nebezpečné alkalicko-kremičité rozpínanie [4].

Kamenivo môžeme rozdeľovať z viacerých hľadísk. Najčastejšie podľa:

- **Pôvodu:**

- **Prírodné** – je to kamenivo z minerálnych zdrojov, ktoré sa ťaží v nivách riek alebo sa získava ťažením pomocou odstrelov či drvením v lomoch [3].
- **Umelé** – kamenivo minerálneho pôvodu, získané priemyselnými postupmi, najčastejšie tepelnou úpravou, napr. pri tavbe kovov, spaľovaní [4].
- **Recyklované** – získava sa úpravou anorganických materiálov, ktoré už pred tým boli použité v stavebnej konštrukcii alebo prvku [1].

- **Objemovej hmotnosti:**

- **Ťažké** – kamenivo s objemovou hmotnosťou zrn vysušených v sušiarňi s hodnotou $\geq 3000 \text{ kg/m}^3$.

Uplatňuje sa pri výrobe ťažkých betónov, ktoré sa používajú ako ochrana v prostredí s rádioaktívnym alebo röntgenovým žiarením, kamenivo do betónov na mechanicky odolné podlahy či do vozoviek s nízkym obrusom. Patrí sem napr. kamenivo vyrobené z magnetitu, hematitu, barytu, syntetického korundu [1, 4].

- **Hutné** – kamenivo s objemovou hmotnosťou zŕn vysušených v sušiarňi s hodnotou v rozmedzí 2000 – 3000 kg/m³.

Používajú sa pri výrobe väčšiny betónov a mált, na násypy a do asfaltobetonových vozoviek. Patria sem kamenivo vyrobené napr. z čadiča, amfibolu, vápenca, dolomitu [1, 4].

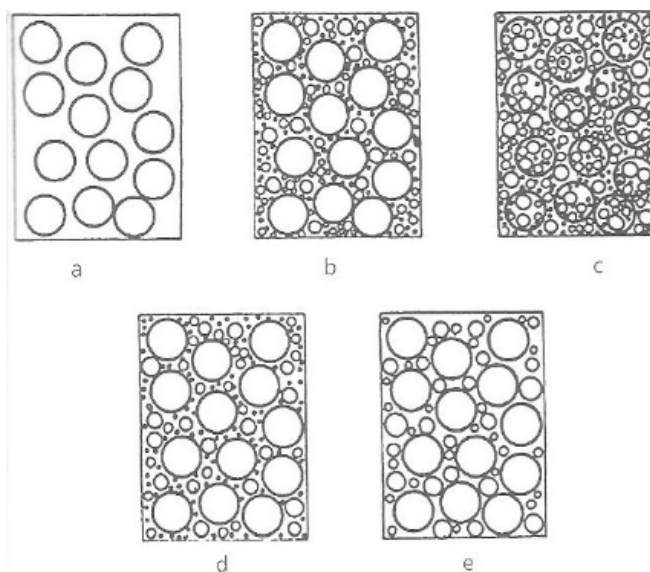
- **Pórovité** – kamenivo s objemovou hmotnosťou zŕn vysušených v sušiarňi s hodnotou ≤ 2000 kg/m³ a sypanú hmotnosť voľne sypaného kameniva vysušeného v sušiarňi ≤ 1200 kg/m³.

Uplatnenie nachádza hlavne pri výrobe ľahkých mált, omietkových zmesí a betónov s tepelne-izolačnými vlastnosťami. Sú to napr. pemza, tufy, škvára, keramzit, expandovaný perlit [1, 4].

- **Veľkosti zŕn**

- **Drobné** – s veľkosťou zrna do 4 mm.
- **Hrubé** – zrná s veľkosťou 4 – 63 mm.
- **Kalibry** – zrná s veľkosťou 63 – 125 mm.
- **Štrkodrt'** – zmes drobného a hrubého drveného kameniva obmedzená horným sitom (napr. 0-8, 0-16, ...).
- **Štrkopiesok** – zmes drobného a hrubého prírodného ťaženého kameniva obmedzená horným kontrolným sitom.
- **Kamenná múčka (filer)** – kamenivo s vysokým obsahom (min. 70 %) jemných častíc menších ako 0,063 mm, ktoré vzniklo ako odpad pri výrobe a triedení kameniva [5].

Pre kamenivo je typický zrnitý charakter. Zrornosť udáva rozloženie zŕn kameniva podľa veľkosti, vyjadrené v percentách hmotnosti zŕn prepadajúcich sadou sít. Je dôležitou technologickou charakteristikou, lebo výrazne ovplyvňuje tvorbu kostry kameniva, v ktorej má byť objem medzier medzi zrnami minimálny. Zrornosť kameniva sa určuje sitovým rozborom. Podstatou skúšky je rozdelenie zŕn kameniva na jednotlivé frakcie pomocou normovej sady sít so zmenšujúcimi sa otvormi. Preosieva sa premyté a suché kamenivo. Grafickým znázornením sitového rozboru je čiara zrornosti. Ak sú zastúpené všetky veľkosti zŕn, hovoríme o plynulej čiare zrornosti (plynulej zrornosti – granulometrii) [1,6].



Obr. 3.1.1.1 Schematické znázornenie zrnitosti kameniva

- a) rovnako veľké zrná, b) plynulá zrnitosť, c) nahradenie malých zrn veľkými,
d) prerušovaná zrnitosť, e) hrubozrnné kamenivo [1]

3.1.2 Cement

Cement môžeme označiť ako najdôležitejšiu zložku betónu. Je to hydraulické spojivo práškovej konzistencie, najčastejšie šedej farby a je balené v papierových vreciach.

Ide o jemne mletý anorganický materiál, ktorý po zmiešaní s vodou vytvára kašu (tmel, pastu), ktorá v dôsledku chemickej reakcie tuhne a tvrdne. Pri predchádzajúcom zatuhnutí na vzduchu si následne zachováva svoju pevnosť a stabilitu aj vo vodnom prostredí [3].

Obsahuje jemne rozomletý slinok, ktorý môže byť portlandský (kremičitanový) alebo hlinitanový:

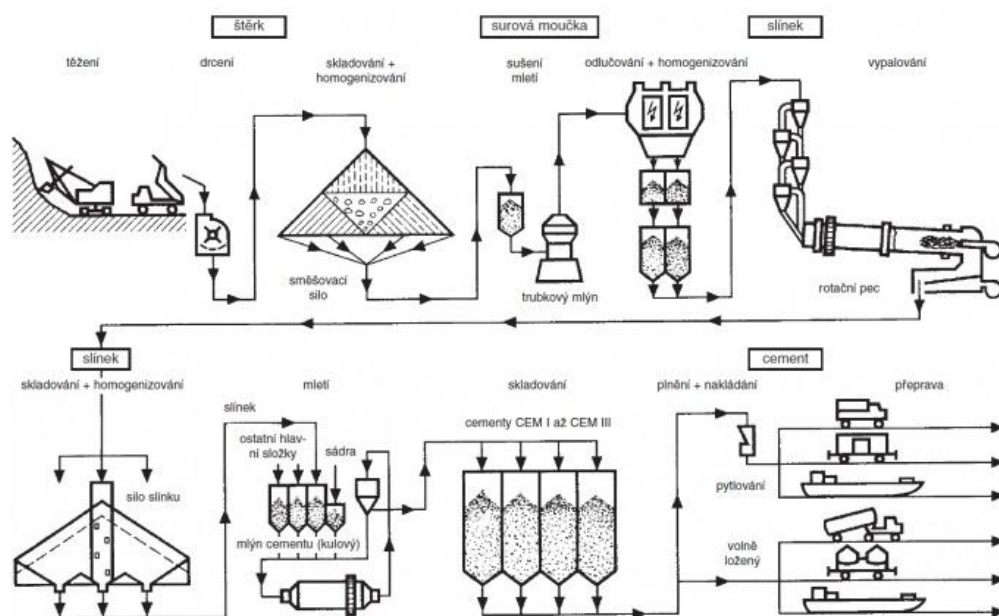
- Kremičitanový – obsahuje viac CaO , SiO_2 a menej Al_2O_3 , Fe_2O_3 .
- Hlinitanový – obsahuje viac CaO , Al_2O_3 a menej SiO_2 , Fe_2O_3 [5].

Cementy na všeobecné použitie sa rozdeľujú na päť hlavných druhov:

- CEM I Portlandský cement.
- CEM II Portlandský cement zámesový.
- CEM III Vysokopecný cement.
- CEM IV Puzolánový cement.
- CEM V Zmesný cement [2].

V závislosti od charakteru východiskových surovín a daných ekonomických ukazovateľov sa používa mokrý, polomokrý (kombinovaný), suchý a polosuchý spôsob výroby portlandského slinku. V súčasnosti je najrozšírenejším spôsobom výroby portlandského slinku (cementu) suchý spôsob [1].

Najdôležitejšími surovinami pre výrobu portlandského cementu sú vápence v množstve okolo 80 %, ďalej v menšom množstve tufy, bridlice či iné horniny. Tie sa ťažia v lomoch pomocou odstrelu alebo rýpadla a následne prepravujú do drviarne, kde sa hrubé kamene drví približne na veľkosť cestného štrku. Požadovaná zmes, rozdrvené základné a korekčné suroviny, je pripravovaná pomocou presných meracích zariadení. Surovinová zmes sa melie v mlynici na jemný prášok, ktorý je súčasne aj vysušovaný. Tento prášok je potom prepravovaný do síl na surovinovú múčku, kde sa ďalej homogenizuje. Potom prebieha výpal v rotačnej peci pri teplote nad hranicou slinutia (okolo 1450 °C) a následné prudké ochladenie. Týmto procesom vzniká portlandský slinok, ktorého chemické zloženie obsahuje oxidy CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 v množstve 95 až 97 %. Skladuje sa v slinkových silách, odkiaľ je potom dopravený do guľových cementových mlynov. Tu sa melie na veľmi jemný prášok – portlandský cement, s prípadnými ďalšími zložkami v závislosti od požadovaného druhu cementu [1, 3].



Obr. 3.1.1.2 Schéma výroby cementu [3]

Pretože mletie cementu je náročné na spotrebu elektrickej energie, pri mletí, najmä na vyššiu jemnosť, sa pridávajú intenzifikátory mletia (trietanolamín,

propylénglykol, kamenné uhlie atď.) v množstve 0,02 až 0,5 % z hmotnosti cementu. Umožňujú skrátiť čas mletia o 10 až 35 % [1].

Vlastnosti portlandského cementu výrazne ovplyvňuje rýchlosť chladenia slinku. Rýchlejšie chladené slinky obsahujú väčšie množstvo sklovitej fázy (v rozmedzí 2 až 12 %), ktorá potom vykazuje vyššie 28-dňové pevnosti, ťažšie sa melú, zlepšujú odolnosť cementu proti síranovým vodám, majú väčšie hydratačné teplo a menšie zmrašťovanie. Najkvalitnejší cement možno dostať zo slinku, ktorý bol do teploty 1250 °C chladený pomaly a ďalej rýchlo [1].

3.1.3 Voda

Z technologického hľadiska rozdeľujeme betonársku vodu na zámesovú a ošetrovaciu. Obidva druhy vody musia splňovať kvalitatívne požiadavky podľa normy. O vhodnosti vody, ktorú chceme použiť pre výrobu betónu rozhoduje zdroj, z ktorého pochádza. Norma [7] rozlišuje tieto druhy vody:

- pitná,
- recyklovaná z postupov betonárskych prác,
- voda z podzemných zdrojov,
- prírodná povrchová a priemyselná odpadová,
- morská alebo poloslaná,
- splašková.

Pitná voda sa považuje za vhodnú aj bez jej ďalšieho skúšania, ostatné druhy vody je nutné skúšať. Skúšky chemických vlastností sa uskutočňujú v akreditovaných laboratóriách, ktoré majú príslušné vybavenie a oprávnenie tieto skúšky vykonávať [1].

Skúšobné metódy pre stanovenie jednotlivých parametrov sú: nerozpustnosť častíc, pH, zafarbenie, obsah chloridov, síranov, dusičnanov, uhličitanov a birkarbonátov, sírníkov, fosforečnanov vo fibráte [2].

• zámesová voda

Voda, ktorá sa dávkuje na výrobu čerstvého betónu, sa nazýva zámesová a v betóne plní táto voda dve hlavné funkcie:

- technologická zložka – v závislosti od dávky ovplyvňuje reologické vlastnosti betónu (napr. spracovateľnosť, pohyblivosť, trvanlivosť...),

- hydratačná zložka – reakciou s cementom dochádza k hydratácii, vzniknutý cementový kameň tvorí väzbu medzi zrnami kameniva [3].

Množstvo vody potrebné na plnú hydratáciu závisí od mineralogického zloženia cementu a podmienok hydratácie. Pohybuje sa približne okolo 25 – 35 % hmotnosti cementu [3].

Pomer hmotnosti vody k hmotnosti cementu v čerstvom betóne sa vyjadruje tzv. vodným súčiniteľom (v/c). V skutočnosti neznižuje pevnosť a trvanlivosť betónu prídavok vody sám o sebe, ale vysoký vodný súčiniteľ. Inak povedané, pokiaľ množstvo vody pomôže spracovateľnosti, môže byť zvýšené, ale súčasne je treba zvyšovať aj dávku cementu [5].

Počas procesu tuhnutia a tvrdnutia sa zámesová voda delí na fyzikálne viazanú vodu, chemicky viazanú vodu a vodu voľnú. Chemicky viazanú vodu možno opäť uvoľniť iba pri zvýšenej teplote (od 200 do 700 °C). Voda fyzikálne viazaná je adsorbovaná na povrchu jemných častíc a v kapilárach, pri vyparovaní spôsobuje zmršťovanie betónu v dôsledku kapilárnych napätí. Voľná voda sa vyskytuje v dutinách a póroch a najľahšie sa odparuje [1].

- **ošetrovacia voda**

Ošetrovacia voda sa používa po zatuhnutí betónu, na udržanie vlhkosti v betóne, počas doby jeho tvrdnutia. Mala by aspoň čiastočne nahradiť odparenú zámesovú vodu, aby sme predišli vzniku veľkého kapilárneho napätia a zmršťovania betónu. Tým predídeme vzniku množstva zmršťovacích trhlín, ktoré majú negatívny vplyv na dlhodobú pevnosť a trvanlivosť betónu [8].

3.1.4 Prísady

Prísady do betónu sú chemické zlúčeniny, ktoré sa pridávajú pred miešaním, počas miešania alebo pri dodatočnom miešaní čerstvého betónu pred jeho uložením, a to v malom množstve (zvyčajne neprevyšujúcom 5 % hmotnosti cementu) za účelom ovplyvňovať vlastnosti čerstvého a zatvrdnutého betónu [2].

V dnešnej dobe je dôležitou súčasťou technológie výroby betónu používanie prísad. Možno nimi účinne regulovať čas (spomaliť alebo urýchliť) tuhnutia a tvrdnutia betónu, zlepšiť vodotesnosť, mrazuvzdornosť, odolnosť proti rozmrazovacím soliam.

Umožňujú vyrobiť napr. betóny vysokej pevnosti v tekutom stave bez potreby zhutnenia, znížiť dávku vody potrebnú na výrobu betónu či betónovanie pri nepriaznivých poveternostných podmienkach. Prakticky neexistuje prísada, ktorá ovplyvňuje len jednu vlastnosť betónu. Jeden účinok prísady je dominujúci, je však treba vedieť, že všeobecne každá prísada môže ovplyvniť aj akúkoľvek inú vlastnosť betónu, a to ako v pozitívnom, tak aj negatívnom zmysle [1].

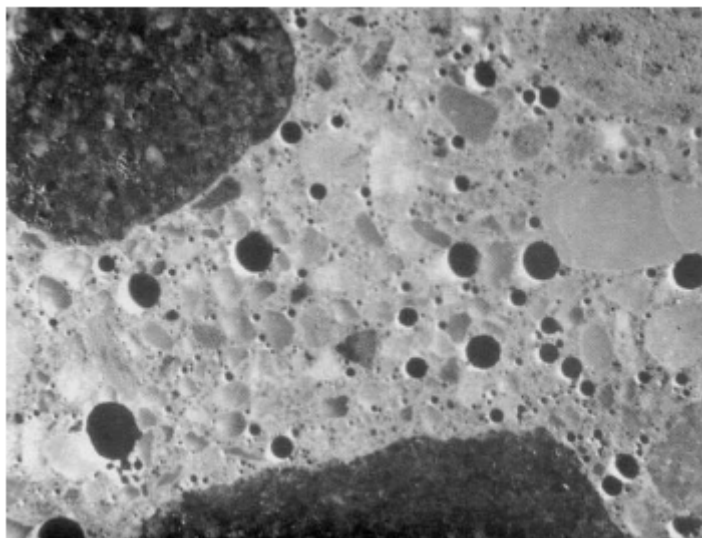
Prísady sú v sypkej, častejšie však v tekutej forme. Na stavbu sa dodávajú v sudoch alebo cisternách. Väčšinou sa musia chrániť proti mrazu. Sypké prísady sa dopravujú a skladujú obdobne ako cement [5].

Prísady do betónu delíme na:

- **plastifikačné** – umožňujú znížiť množstvo zámesovej vody pri rovnakej dávke cementu, teda redukovať vodný súčiniteľ, čím sa zvyšuje pevnosť betónu. Pri nezmenenej dávke vody zlepšujú konzistenciu a reologické vlastnosti čerstvého betónu a fyzikálne vlastnosti zatvrdnutého betónu [1].

Plastifikačné prísady sa klasifikujú na základe ich účinnosti, čím sa rozumie zníženie množstva zámesovej vody bez zmeny konzistencie čerstvého betónu. V zásade ich možno deliť na:

- obyčajné plastifikátory (zníženie dávky vody o 5 – 15 %),
- superplastifikátory (zníženie dávky vody o 15 – 30 %),
- hyperplastifikátory (zníženie dávky vody o viac ako 30 %) [9].
- **stabilizačné** – majú opačný vplyv na spracovateľnosť ako plastifikačné prísady. Používajú sa, keď sa neočakávané prekročí dávka vody a je nutné upraviť konzistenciu [10].
- **prevzdušňovacie** – vytvárajú vo veľkom počte uzavreté vzduchové póry, jemne distribuované v betóne. Betóny s touto prísadou lepšie odolávajú mrazu a agresivite morskej vody. Tieto póry menia pórovitú štruktúru cementového kameňa a sieť kapilár, vytvárajú expanzný priestor pre zväčšujúci sa objem kryštálov ľadu a soli, znižujú hydrostatický tlak v pórovitej štruktúre. Kritérium účinnosti prevzdušňovacej prísady na trvanlivosť betónu je vzdialenosť pórov od seba navzájom, označovaný ako súčiniteľ priestorového rozloženia vzduchových pórov L [2].



Obr. 3.1.4.1 Mikroskopická snímka vzorky prevzdušneného betónu [10]

- **urýchľovacie** – tieto prísady sa rozdeľujú do dvoch skupín na urýchľovače tuhnutia cementu a na urýchľovače tuhnutia a tvrdnutia cementu. Urýchľovače tuhnutia skracujú dobu prechodu čerstvého betónu z plastického do tuhého stavu. Prísady urýchľujúce tuhnutie a tvrdnutie cementu ovplyvňujú najmä hydratáciu alitu (C3S), a tým podporujú vývin začiatočných pevností, umožňujú rýchlejšie dokončenie povrchov betónu, oddebnenie a dosiahnutie požadovaných vlastností, hlavne pevnosti v kratšom čase [1].
- **spomaľovacie** – spomalenie hydratačných procesov je užitočné vtedy, keď je potrebné udržať požadovanú konzistenciu betónu na dlhší čas. Používajú sa, pri nutnosti kompenzovať vplyv vysokých teplôt, ktoré skracujú čas tuhnutia alebo pri doprave betónovej zmesi na dlhšiu vzdialenosť, kedy je nutné predĺžiť čas medzi miešaním a uložením čerstvého betónu. Ich dávka je obmedzená podmienkou, že použitie nesmie spôsobiť viac než 5 % úbytku 28dennej pevnosti [1, 10].
- **protikorózne tzv. inhibítory výstuže** – zvyšuje sa nimi ochrana výstuže v podmienkach, keď sa železobetónová konštrukcia nachádza v agresívnom prostredí. Väčšinou ide o zlúčeniny silných zásad a slabých kyselín, ktoré sú schopné stabilizovať zásadité prostredie pórového roztoku [10].
- **hydrofóbne** – ich použitie obmedzuje schopnosť betónu prijímať vodu alebo vlhkosť z okolitého prostredia, čím sa zvyšuje mrazuvzdornosť a trvanlivosť betónu. Okrem všeobecných požiadaviek sa hydrofóbne prísady posudzujú podľa jedného z dvoch

kritérií kapilárnej kondenzácie. Používajú sa mydlá vápenaté, hlinité, zinočnaté a taktiež soli nízkomolekulárnych silikónových živíc, polyetylhydrosiloxany, organické kyseliny aspoň s osemnástimi uhlíkmi, naftalénové mydlo [2].

- **tesniace** – zvyšujú hutnosť cementového kameňa, znižujú jeho pórovitosť, hlavne objem makropórov. Inak povedané, sťažujú prestup kvapalín alebo plynov cez betón. Možno ich rozdeliť na prísady znižujúce permeabilitu (priepustnosť) betónu a na hydrofóbne prísady, ktoré vytvárajú na povrchu betónu a na vnútorných stenách kapilár film odpudzujúci vodu, ktorý zabraňuje jeho navlhnutiu [1].
- **protizamrazovacie** – znižujú teplotu tuhnutia vody a zabraňujú zamrznutiu čerstvého betónu. V závislosti od druhu a dávky, umožňujú hydratáciu cementu pri teplote do $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, prípadne až do $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tieto prísady teda umožňujú betónovanie aj pri záporných teplotách. K bežným látkam používaným na zníženie teploty mrznutia vody patrí kuchynská soľ NaCl, ktorá sa spravidla kombinuje s CaCl_2 [11].
- **rozpínavé (expanzívne)** – sú to látky, ktoré sa využívajú na kompenzovanie zmrašťovania cementového kompozitu (malty, betónu) v plastickom stave alebo jeho zmrašťovania v zatvrdnutom stave [1].
- **biocídne** – obmedzujú alebo potláčajú biologickú koróziu betónu, ktorú zapríčiňujú mikroorganizmy ako sú baktérie, plesne, riasy, lišajníky. Výsledkom ich pôsobenia je vznik kyseliny, ktorá reaguje so zatvrdnutou cementovou kašou a betón je hlbšie napadnutý. Účinnosť biocídnych prísad závisí od ich chemického zloženia, koncentrácie, času pôsobenia, druhu mikroorganizmu a podobne [2].

3.1.5 Prímesi

Prímesi sú jemné až ultrajemné prachovité látky, ktoré pridávame do čerstvého betónu pri jeho výrobe za účelom zlepšenia niektorých vlastností alebo k docieleniu zvláštnych vlastností. Na rozdiel od prísad sa dávkujú rádovo v takom množstve ako napr. cement [2, 10].

Všeobecne ich môžeme rozdeliť na dva základné typy:

- **inertné (typ I)**

Nezúčastňujú sa v procese hydratácie cementu, preto sa nazývajú aj pasívne. Do betónu ich pridávame väčšinou pre dosiahnutie hutnejšej štruktúry betónu, na vylepšenie reologických vlastností alebo zlepšenie spracovateľnosti. Ich použitím môže byť znížená medzerovitosť klasického kameniva, čo vedie na zníženie spotreby cementu. Tento typ je svojou chemickou podstatou taký, že netuhne ani netvrdne, a to ani pri použití rôznych budičov. Patria sem napríklad mleté horniny, múčky (filer), pigmenty [2, 10].

- **aktívne (typ II)**

Pre prímеси typu II sú charakteristické puzolánové vlastnosti alebo latentná hydraulická. Aktívne prímеси, pri ktorých v styku s vodou nastáva puzolánová reakcia, nahrádzajú časť cementu. Za najdôležitejšiu a najčastejšie využívanú prímes anorganického pôvodu sa považuje kremičitý úlet. Ďalej do typu II zaraďujeme mletú vysokopecnú strusku, lietavý popolček z uhlia, metakaolín a kondenzovanú kyselinu kremičitú [13].

Podľa chemického zloženia ich rozdeľujeme do 3 skupín:

- látky obsahujúce amorfné SiO_2 – v množstve nad 47 % hmotnosti vykazujúce puzolánové vlastnosti,
- pálené hliny, popolčeky, vysokopecná struska – vykazujúce latentne hydraulické vlastnosti (obsah CaO je 16 – 53 % hmotnosti). Vyrábajú sa rozomletím málo pálených ílovitých zemín na jemnosť blízku cementu
- látky obsahujúce sopečné sklo – z vulkanických procesov. Sú to pravé puzolány ako sú tufy, trasy, sopečné sklo [2].

3.2 Vlastnosti betónu

Vlastnosti betónu sa stanovujú rôzne na čerstvom betóne a zatvrdnutom betóne.

3.2.1 Vlastnosti čerstvého betónu

Čerstvý betón (ďalej len ČB) je taký, ktorý bol práve vyrobený a nie je zatvrdnutý, môže sa ešte prevážať (prenášať), ukladať do debnenia a podľa druhu aj čerpať. Pod týmto pojmom sa rozumie stav, keď jeho zložky nemiešané podľa vopred určenej receptúry vytvoria plastickú až tekutú zmes schopnú ďalšieho spracovania. V súčasnosti je najbežnejším medzinárodne uznávaným spôsobom určenia spracovateľnosti ČB stanovenie jeho konzistencie [1, 3, 13].

➤ Konzistencia

Vyjadruje odpor proti pretváraniu. Vyjadruje sa triedou konzistencie podľa výsledkov skúšky a použitej skúšobnej metódy. Jednoducho povedané, konzistencia hovorí ako veľmi alebo málo je čerstvý betón tekutý alebo sypký [12].

Ako zložky betónu ovplyvňujú konzistenciu:

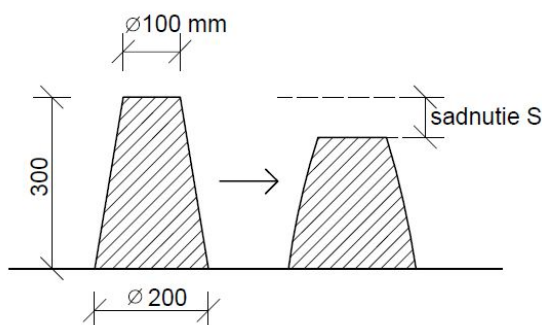
- zámesová voda – má zásadný vplyv na konzistenciu ČB. Betóny s rovnakým vodným súčiniteľom nemajú rovnakú spracovateľnosť,
- kamenivo – ovplyvňuje konzistenciu ČB svojím tvarom, charakterom povrchu, veľkosťou zŕn a zrnitosťou. Oblé a hladké zrná zlepšujú spracovateľnosť, naopak hranaté, drsné a tvarovo nevhodné zrná ju zhoršujú,
- plastifikačné prísady – znižujú vnútorné trenie ČB, a tým zlepšujú jeho spracovateľnosť. Umožňujú zlepšiť spracovateľnosť pri danej dávke vody alebo znížiť dávku zámesovej vody pri zachovaní rovnakej konzistencie
- cement – cementový tmel obaľuje zrná kameniva a zaplňa priestor medzi nimi. Stupeň zaplnenia vyjadruje súčiniteľ utesnenia ψ . Maximálne pevnosti sa dosahujú pri betónoch pri $\psi \approx 1,05$ [1].

Skúšky konzistencie ČB sa musia robiť v čase ukladania betónu alebo pri transportbetóne v čase jeho dodania [1].

Meranie sa robí štyrmi metódami skúšania.

- **skúška sadnutím** [14] – prebieha tak, že ČB sa ukladá do formy tvaru dutého zrezaného kužeľa (Abramsov kužeľ) v troch rovnomerných zhutnených vrstvách až

po okraj. Potom sa forma odstráni plynulým pohybom a meria sa sadnutie betónu voči neodformovanej vzorke,



Obr. 3.2.1.1 Princíp skúšky sadnutím kužeľa [14]

- **skúška rozliatím** [15] – pri skúške sa ČB zhutní v skúšobnej nádobe a postaví na pohyblivý stolík s rovnou doskou. Po odstránení formy sa pätnástimi zdvihmi dosky stola dosiahne rozliatie betónu. Miera rozliatia betónu sa meria v dvoch smeroch rovnobežne s hranami stola (obr. 3.2.1.2),



Obr. 3.2.1.2 Princíp skúšky rozliatím [10]

- **skúška zhutniteľnosti** [16] – v experimente sa táto skúška neprevádzala, práca sa ňou ďalej nezaobrá,
- **skúška VeBe** [17] – v experimentálnej časti sa neprevádzala, preto sa o tejto ďalej práca nezmieňuje.

➤ Objemová hmotnosť

Objemová hmotnosť ČB je daná hmotnosťou 1 m³ hotového betónu (uloženého a zhutneného) [1].

Všeobecne ju možno vyjadriť vzťahom:

$$\rho_{b,h} = \frac{m_{b,h}}{V_b} \quad (1)$$

kde: $\rho_{b,h}$ je objemová hmotnosť čerstvého betónu (kg/m³),

$m_{b,h}$ je hmotnosť zhutneného čerstvého betónu (kg),

V_b je objem zhutneného čerstvého betónu (m³).

Objemová hmotnosť betónu môže nadobúdať hodnoty od cca 400 kg/m³ do cca 6 000 kg/m³. Výslednú $\rho_{b,h}$ najviac ovplyvňuje voľba kameniva a popríklad špeciálne spevňujúce prísady [3].

Objemová hmotnosť ČB narastá so zväčšujúcim sa obsahom cementu, znižovaním vodného súčiniteľa alebo zmenšovaním pórovitosti, naopak klesá s rastúcim vodným súčiniteľom alebo zväčšujúcim sa obsahom vzduchu [1].

➤ Obsah vzduchu

Počas miešania sa do ČB dostáva vzduch, ktorý sa pri následnom uložení usilujeme odstrániť zhutňovaním, ale aj dôkladne zhutnený betón však spravidla obsahuje malé množstvo vzduchu.

S rastúcou hutnosťou betónu, a teda klesajúcim obsahom vzdušných pórov, sa zvyšuje pevnosť betónu. Určité limitované množstvo mikroskopických pórov vnesených prevzdušňovacou prísadou niektoré vlastnosti betónu, ako sú vodotesnosť, mrazuvzdornosť, trvanlivosť apod. zlepšuje. Prítomnosť makroskopických vzduchových pórov tieto vlastnosti zhoršuje [1].

Kvalita povrchovej vrstvy betónu je mimo iné ovplyvňovaná pórovitosťou betónu. Jednou z charakteristík pórovitosti betónu je celkový obsah vzduchu, ktorý možno stanoviť niekoľkými metódami [30].

Pre čerstvý betón možno použiť:

- tlakomernú metódu,
- prístroj Airvoid analyzer.

Pri zatvrdnutom betóne sa obsah vzduchu zisťuje pomocou:

- ortuťovej porozimetrie,
- automatickej mikroskopickej analýzy,
- počítačovej tomografie.

3.2.2 Vlastnosti zatvrdnutého betónu

Najdôležitejšou vlastnosťou zatvrdnutého betónu je jeho pevnosť, ktorou sa podrobnejšie zaoberá kapitola 3.3. Ďalšími vlastnosťami sú:

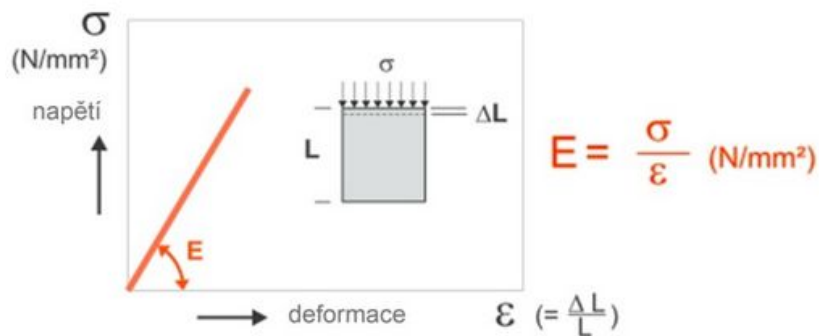
➤ Pružnosť

Pri prípustnom krátkodobom napätí sa betón správa ako pružná látka. Veľkosť pretvorenia závisí na veľkosti napätia, pretvárnych vlastnostiach kameniva a cementového kameňa, na hutnosti, vlhkosti a veku betónu. Pretvorenie nie je úmerné napätiu [18].

Pretvárne vlastnosti betónu sú definované podľa spôsobu zaťaženia na:

- statické – prejavujú sa po krátkej dobe zaťaženia alebo pri opakovanom krátkodobom zaťažení,
- dynamické – prejavujú sa po opakovanom zaťažení,
- dlhodobé – prejavujú sa po dlhodobom zaťažení a majú za následok trvalé deformácie [18].

Modul pružnosti betónu E je základnou (charakteristickou) vlastnosťou betónu, ktorá sa používa pre výpočet deformácií (priehybu, zmraštenia, dotvarovania). Vyjadruje závislosť medzi napätím σ a pretvorením ε . Na betóne s vyšším modulom pružnosti sa pri rovnakom zaťažení prejavujú menšie deformácie [3].



Obr. 3.2.2.1 Vzťah medzi napätím a deformáciou [3]

Pozdĺžna deformácia v smere pôsobiaceho zaťaženia vyvoláva v rovnakom čase priečnu deformáciu. Pomer priečnej deformácie k pozdĺžnej deformácii sa nazýva Poissonovo číslo alebo súčiniteľ priečneho pretvorenia [1].

➤ **Zmrašťovanie**

Betón sa zmrašťuje buď z dôvodu chemického procesu hydratácie cementu (autogénne zmrašťovanie), a to najmä pri vysokopevnostných betónoch, a ďalej vplyvom vysychania betónu počas tvrdnutia a v priebehu používania konštrukcie [19].

- **Plastické zmrašťovanie (kapilárne zmrašťovanie)** – nastáva v ČB krátko po jeho spracovaní počas tzv. pokojnej fázy. Je spôsobené stratou vody zo spracovaného betónu, ktorá uniká intenzívnym odparovaním z povrchu, taktiež aj odsávaním z podložia alebo debnenia. Toto vedie k rozdielnym objemovým zmenám, a tým k následnému skráteniu betónu vo všetkých smeroch, čo spôsobuje ťahové napätia, v dôsledku ktorých vznikajú trhliny [1, 13].
- **Zmrašťovanie sušením** – keď sa betón nasiaknutý vodou uloží do prostredia s relatívnou vlhkosťou nižšou ako 100 %, začne sa vysúšať. Voda sa bude odparovať dovtedy, kým nenastane rovnováha medzi obsahom vlhkosti v betóne a okolitým prostredím. Pri vysychaní vznikajú v betóne veľké napätia, ktoré spôsobujú zmenšovanie objemu, a tým zmrašťovanie. Keď napätie v materiáli prekročí pevnosť betónu vznikajú trhliny [1].
- **Autogénne zmrašťovanie (samovysychanie)** – je to jav, kedy objem spojiva a vody pred hydratáciou je väčší než výsledný objem zatvrdnutého cementového tmelu. Pri tomto type zmrašťovania ide o samovysychanie v celom objeme betónu, zatiaľ čo pri

zmrašťovaní spôsobenom odparovaním vody ide o vysychanie povrchových vrstiev [3, 13].

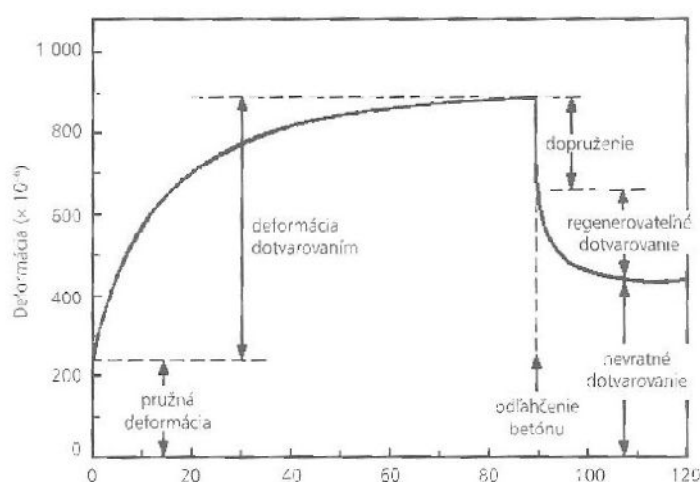
- **Karbonatizačné zmrašťovanie** – je výsledkom dlhodobej reakcie vzdušného oxidu uhličitého so zložkami cementovej kaše, čo spôsobuje zmenšenie objemu betónu. Túto vlastnosť výrazne ovplyvňuje relatívna vlhkosť, najintenzívnejšie prebieha pri relatívnej vlhkosti 50 % [1, 13].

Stanovenie zmrašťovania sa robí podľa normy. Skúšobné telesá sa po odformovaní uložia do predpísaného prostredia a zisťujú sa dĺžkové zmeny s presnosťou minimálne $1 \cdot 10^{-5}$.

➤ Dotvarovanie

Je to deformácia spôsobená plastickým pretvorením betónu vplyvom vonkajšieho zaťaženia. Prejavuje sa pri veľkom a dlhodobom (niekoľko mesiacov až rokov) zaťažení betónu. Betón sa snaží veľkému zaťaženiu „podvoliť“, čo sa prejavuje rôznymi deformáciami. Typickou konštrukciou, kde je potrebné rátať s dotvarovaním betónu už pri jej samotnom návrhu, je napr. letmo betónovaný predpätý most väčšieho rozpätia [3].

Typický priebeh dotvarovania obyčajného betónu pri dlhodobom aplikovaní tlakového zaťaženia je znázornený na obr. 3.2.2.2.



Obr. 3.2.2.2 Priebeh dotvarovania obyčajného betónu [1]

3.2.3 Tepelné vlastnosti betónu

➤ Teplotná rozťažnosť

Je to vratná zmena objemu telesa spôsobená zmenou jeho teploty. Betón so vzrastajúcou teplotou zväčšuje svoj objem a naopak s klesajúcou teplotou objem znižuje [3].

Veľkosť dĺžkovej zmeny betónu pri zmene teploty sa vypočíta zo vzťahu

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \quad (2)$$

kde: Δl je dĺžková zmena (m),

α je súčiniteľ teplotnej lineárnej rozťažnosti betónu (1/K),

l_0 je merná dĺžka pri východiskovej teplote (m),

ΔT je teplotný rozdiel (K).

➤ Tepelná vodivosť

Je to fyzikálna veličina, ktorá udáva schopnosť materiálu viesť teplo. Charakterizuje ju súčiniteľ tepelnej vodivosti (λ), ktorý je definovaný množstvom tepla, ktoré musí za jednotku času prejsť materiálom s veľkosťou 1 m^2 pri hrúbke 1 m [20].

Súčiniteľ tepelnej vodivosti betónu ovplyvňuje jeho objemová hmotnosť. Ľahké betóny, s vyššou pórovitosťou majú nižšie súčinitele tepelnej vodivosti, teda lepšie tepelnoizolačné vlastnosti [1].

➤ Merná tepelná kapacita

Vyjadruje množstvo tepelnej energie, ktorú treba dodať 1 kg materiálu, aby sa jeho teplota zvýšila o 1 K [1]. Pri všetkých látkach sa s klesajúcou teplotou merná tepelná kapacita znižuje a pri teplotách blízkyh 0 K má veľmi malú hodnotu [21].

Na mernú tepelnú kapacitu cementových kompozitov nemá výrazný vplyv druh kameniva, lebo mernú tepelnú kapacitu hornín ovplyvňuje ich mineralogické zloženie

len málo, výrazne však na ňu pôsobí pórovitosť (vodný súčiniteľ), obsah vody a teplota [1].

➤ Teplotná vodivosť

Udáva rýchlosť, pri ktorej sa mení teplota v danom materiáli. Je funkciou tepelnej vodivosti, mernej tepelnej kapacity a objemovej hmotnosti. Vzťah medzi nimi udáva súčiniteľ teplotnej vodivosti [1].

Medzi činitele ovplyvňujúce teplotnú vodivosť patrí vodný súčiniteľ, druh kameniva, stupeň hydratácie cementu, pórovitosť, vlhkosť a teplota. Typické hodnoty súčiniteľa teplotnej vodivosti sa pohybujú v rozpätí $5,55 \cdot 10^{-7}$ až $22,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ($0,002$ – $0,008 \text{ m}^2/\text{h}$) [1].

3.3 Pevnosť betónu

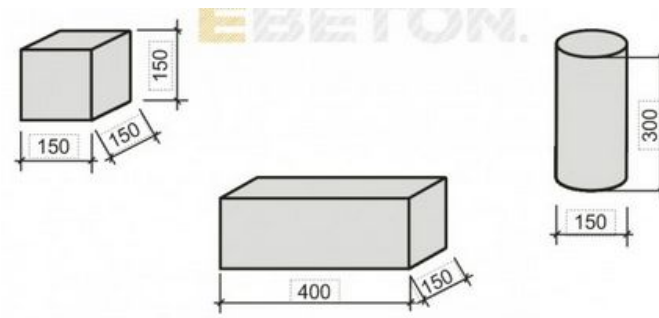
Hoci najdôležitejšou vlastnosťou betónu je pevnosť v tlaku, bakalárska práca sa touto zaoberá len okrajovo, a pozornosť je sústredená na pevnosť betónu v ťahu.

Ťahové charakteristiky betónu majú zásadný vplyv na rozvoj trhlín a hodnotenie medzného stavu použiteľnosti konštrukcií. Pevnosť betónu v ťahu je dôležitá pri betónových prvkoch a konštrukciách, kde nesmú vznikať trhliny alebo je obmedzená ich maximálna šírka.

Pokiaľ nie je stanovené inak, skúšky pevnosti sa stanovujú na normovaných skúšobných telesách po 28 dňoch tvrdenia. Menej často sa tieto skúšky prevádzajú aj na jadrových vývrtoch. Vždy sa skúšajú minimálne tri telesá. Vzorky, ktoré sa neštandardne porušia, sa zo skúšky vylúčia (predpokladá sa u nich nejaká chyba). O každej skúške a jej výsledkoch sa vedie záznam – protokol. Pred vlastnou skúškou sa overuje granulometria skúšobného telesa.

V súčasnosti sa ako skúšobné telesá najčastejšie používajú:

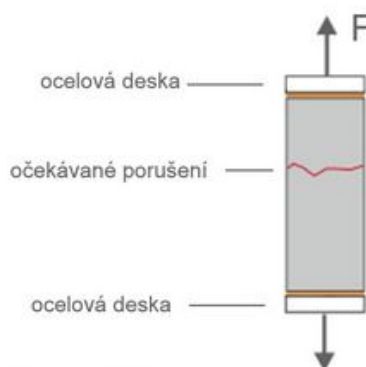
- kocky 150/150/150 mm (možno použiť aj kocky o hrane 100, 200 alebo 300 mm)
- valce o priemere 150 mm a výške 300 mm
- hranole o rozmere 100/100/400 mm alebo 150/150/600 mm



Obr. 3.3.1 Skúšobné telesá z betónu (zatvrdnutý betón) [3]

3.3.1 Pevnosť v prostom ťahu

Pevnosť v prostom ťahu sa zisťuje na skúšobných telesách, ktoré sa trhacím strojom zaťažujú osovým ťahom v pozdĺžnom smere.



Obr. 3.3.1.1 Princíp skúšky pevnosti betónu v prostom ťahu [3]

Pevnosť v prostom ťahu sa vypočíta zo vzťahu:

$$f_t = \frac{F_{\max}}{A} \quad (3)$$

kde: f_t je pevnosť betónu v prostom ťahu (N),

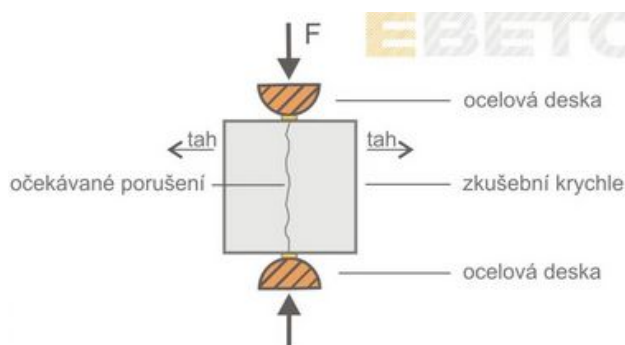
F_{\max} je veľkosť zaťaženia pri porušení skúšobnej vzorky (MPa),

A je plocha priečného prierezu skúšobného telesa (mm^2).

Táto skúška sa vykonáva len výnimočne, pretože jej realizácia je náročná. Komplikuje ju nutnosť prilepenia ocelových dosiek ku vzorke. Prilepenie musí mať perfektnú geometriu a pevnosť vyššiu než je pevnosť skúšaného betónu. Z tohto dôvodu sú bežnejšie skúšky betónu v priečnom ťahu alebo v ťahu ohybom.

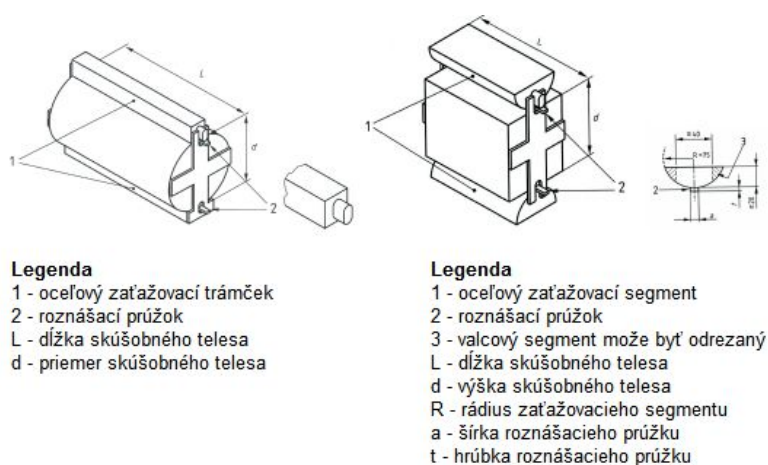
3.3.2 Pevnosť v priečnom ťahu

Táto skúška sa prevádza podľa normy [22]. Robí sa na skúšobných telesách, ktoré sa vystavia tlaku v úzkom pruhu po jeho dĺžke. Toto vyvolá vnútri telesa priečne napätie v ťahu a dôjde k porušeniu výslednou ťahovou silou, ktorá je kolmá na pôvodné tlakové namáhanie. Skúšobná vzorka sa rozštípe.



Obr. 3.3.2.1 Princíp skúšky pevnosti betónu v priečnom ťahu [3]

Pre vyvodenie tlaku sa používa skúšobný lis s ocelovým zaťažovacím trámcom. Na prenos zaťaženia z ocelového trámca do skúšobného telesa slúžia roznášacie prúžky. Roznášacie prúžky sú vyrobené z drevovláknitej dosky s objemovou hmotnosťou viac ako 900 kg/m^3 , šírkou $15 \pm 1 \text{ mm}$, hrúbkou $4 \pm 1 \text{ mm}$ a dĺžkou väčšou než je dĺžka skúšobného telesa. Každý roznášací prúžok sa smie použiť len raz. Najčastejšie sa používajú valcové skúšobné telesá. Pri použití iných skúšobných telies, kociek alebo trámcov, sa namiesto štandardných rovných tlačných dosiek používajú valcové zaťažovanie segmenty.



Legenda
1 - ocelový zaťažovací trámček
2 - roznášací prúžok
L - dĺžka skúšobného telesa
d - priemer skúšobného telesa

Legenda
1 - ocelový zaťažovací segment
2 - roznášací prúžok
3 - valcový segment môže byť odrezaný
L - dĺžka skúšobného telesa
d - výška skúšobného telesa
R - rádius zaťažovacieho segmentu
a - šírka roznášacieho prúžku
t - hrúbka roznášacieho prúžku

Obr. 3.3.2.2 Skúšanie na valcových a kockových (hranolových) skúšobných telesách

[23]

➤ Skúšobné telesá

Otrú sa dotykové plochy vodiaceho prípravku a roznášacích prúžkov. Potom sa z povrchu telesa otrie voda a teleso sa zmeria a zváži. Následne sa skúšobné teleso umiestni do stredu lisu. Na usadenie skúšobného telesa a roznášacích prúžkov do správnej polohy sa používa vodiaci prípravok. V zaťažovacej stredovej rovine sa opatrne na teleso osadia dole aj hore roznášacie prúžky, v prípade potreby aj zaťažovacie trámčeky.

➤ Skúšobný postup

Musíme zaistiť, aby bolo skúšobné teleso vycentrované. Po správnom usadení vzorky v skúšobnom lise sa nastaví konštantná rýchlosť zaťažovania (0,04 – 0,06 MPa). Zaťažuje sa plynule, bez nárazu, a zaťaženie sa nepretržite zvyšuje stanovenou konštantnou rýchlosťou až do porušenia.

➤ Vyjadrenie výsledkov

Pevnosť v priečnom ťahu na valcových skúšobných telesách sa určí vzťahom:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (4)$$

kde: f_{ct} je pevnosť v priečnom ťahu (MPa),

F je maximálne zaťaženie (N),

L je dĺžka dotykovej priamky telesa (mm),

d je priečny rozmer telesa (mm).

Pevnosť v priečnom ťahu na kockových skúšobných telesách sa zistí vzťahom:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a^2} \quad (5)$$

kde: f_{ct} je pevnosť v priečnom ťahu (MPa),

F je maximálne zaťaženie (N),

a^2 je priečny rozmer telesa (mm).

Pevnosť v priečnom ťahu na hranolových skúšobných telesách sa určí podľa vzťahu:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot b \cdot h} \quad (6)$$

kde: f_{ct} je pevnosť v priečnom ťahu (MPa),

F je maximálne zaťaženie (N),

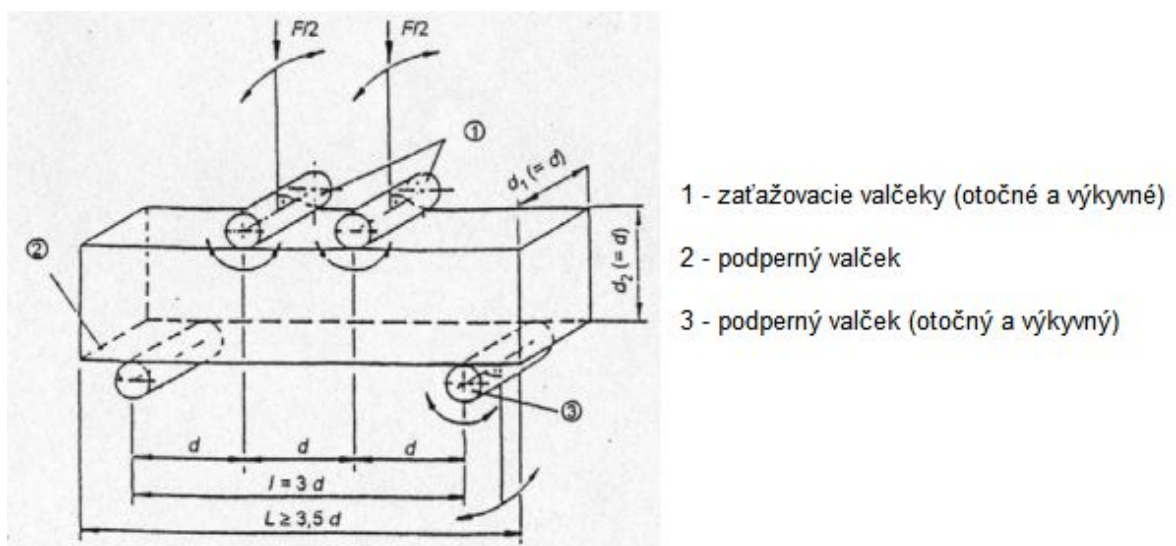
b, h je priečny rozmer telesa (mm).

3.3.3 Pevnosť ťahu ohybom

Skúšanie pevnosti v ťahu ohybom sa robí podľa normy [24]. Skúšobné telesá sú vystavené ohybovému momentu od zaťaženia prenášaného prostredníctvom horných zaťažovacích a spodných podporných valčekov. Zaťaženie, pri ktorom dôjde k porušeniu, sa zaznamená a následne sa z neho vypočíta pevnosť v ťahu ohybom.

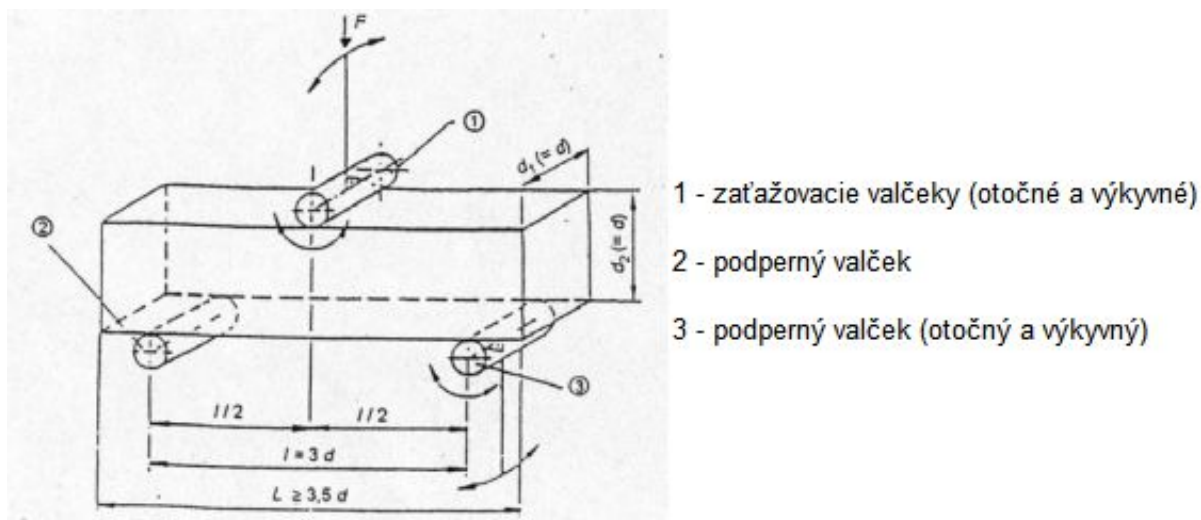
Podľa spôsobu usporiadania zaťaženia skúšame ohyb pri:

- **Štvorbodovom usporiadaní** – toto usporiadanie má vyššiu vypovedajúcu hodnotu o pevnosti betónu v ťahu za ohybu, lebo skúšobné teleso sa poruší v strednej tretine medzi oboma silami od zaťaženia.



Obr. 3.3.3.1 Usporiadanie zaťažovania skúšobného telesa (zaťažovanie dvoma bremenami) [25]

- **Trojbodovom usporiadaní** – pri tomto usporiadaní sa vždy jedná o kombináciu ohybu a šmyku.



Obr. 3.3.3.2 Usporiadanie zaťažovania skúšobného telesa (zaťažovanie jedným bremenom uprostred) [25]

➤ Skúšobné telesá

Používajú sa výhradne hranolové skúšobné telesá. Pokiaľ rozmery alebo tvary skúšobných telies nezodpovedajú požadovaným, musia sa upraviť. Nerovné povrchy sa zrovnávajú brúsením a odchýlky uhlov sa opravujú odrezaním alebo brúsením. Z povrchu telies, ktoré boli ošetrované vo vode, sa otrie voda pred ich vložením do lisu.

➤ Skúšobný postup

Všetky zaťažovacie a podporné valčeky musia ležať rovnomerne na skúšobnom telese. Nastaví sa konštantná rýchlosť zaťažovania (0,04 – 0,06 MPa/s) a skúšobné teleso sa plynule bez nárazu zaťažuje konštantnou rýchlosťou až doporučenia.

➤ Vyjadrenie výsledkov

Pevnosť v ťahu ohybom pri zaťažovaní dvoma bremenami (štvorbodový ohyb) je potom daná nasledujúcim vzťahom:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (7)$$

kde: f_{cf} je pevnosť v priečnom ťahu (MPa),
 F je maximálne zaťaženie (N),
 a^2 je vzdialenosť medzi podpernými valčekmi (mm),
 d_1, d_2 je priečny rozmer telesa (mm).

Pevnosť v ťahu ohybom pri zaťažovaní jedným bremenom uprostred (trojbodový ohyb) sa vypočíta podľa vzťahu:

$$f_{cf} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a^2} \quad (8)$$

kde: f_{cf} je pevnosť v priečnom ťahu (MPa),
 F je maximálne zaťaženie (N),
 a^2 je priečny prierez telesa (mm).

3.4 Vodný súčiniteľ

Na to, aby mohol v betóne prebehnúť proces hydratácie spojiva, je potrebné určité množstvo vody. Množstvo vody v čerstvom betóne sa vyjadruje pomocou hodnoty vodného súčiniteľa, ktorý predstavuje pomer hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu. Bežne sa jeho hodnota pohybuje v rozmedzí hodnôt 0,3 – 0,6. Betón s nižším vodným súčiniteľom vykazuje lepšie mechanické vlastnosti (pevnosť, modul pružnosti, odolnosť voči priesaku tlakovej vody) a vyššiu trvanlivosť než betón s vyšším vodným súčiniteľom [3].

$$w = \frac{v}{c} \quad (9)$$

kde: w je vodný súčiniteľ,
 v je hmotnosť obsah účinnej vody (kg/m³),
 c je hmotnosť cementu (kg/m³).

Pre dosiahnutie potrebnej plasticity čerstvého betónu, a tým aj požadovanej spracovateľnosti, je potrebné použiť účinnú plastifikačnú prísadu. Použitím plastifikátora možno výrazne znížiť vodný súčiniteľ až na hodnotu 0,2. Z pohľadu mikroštruktúry betónu má práve voda rozhodujúci vplyv na pórovitosť zatvrdnutého cementového kameňa. Prebytočné množstvo vody v ČB, ktoré sa nevyužije na reakcie v procese hydratácie spojiva, zostáva v póroch cementového kameňa ako kapilárna voda. Práve pórovitosť zatvrdnutej cementovej matrice významne ovplyvňuje vlastnosti zatvrdnutého betónu [13].

3.5 Trvanlivosť betónu

Trvanlivosť je všeobecný výraz pre schopnosť odolávať degradácii, ktorá je spôsobená fyzikálnymi, chemickými alebo biologickými vplyvmi či opotrebeniu, ktoré vzniká samotným prevozom stavebného diela. Výslednicou trvanlivosti všetkých komponentov je potom životnosť stavebného prvku, konštrukcie, objektu, ktorá je vlastne kvantifikáciou trvanlivosti (vyjadrenou obvykle v rokoch). V štádiu projektovania hovoríme o návrhovej životnosti, pri konštrukcii, ktorá je už v obehu sa rieši životnosť zostatková [26, 27].

Počas celej doby životnosti musí byť zaistená potrebná resp. požadovaná spoľahlivosť konštrukcie ako aj spoľahlivosť jej čiastkových nosných prvkov tzn. ich návrhové hodnoty. Spoľahlivosť sa hodnotí vo vzťahu k medzným stavom, ktoré porovnávajú účinky zaťaženia na konštrukciu s jej schopnosťou im odolávať aj s ohľadom na vplyvy prostredia. Ako miera spoľahlivosti sa alternatívne používa index spoľahlivosti β alebo pravdepodobnosť poruchy p_f . Ukončenie životnosti možno definovať okamihom, kedy už bola dosiahnutá určitá neprijateľná hodnota niektorého z medzných stavov. Nastáva keď prvok alebo dielo už ďalej nemôžu plniť niektorú svoju funkciu buď vôbec prípadne s nedostatočnou spoľahlivosťou [27].

3.5.1 Povrchová vrstva betónu

Trvanlivosť priamo závisí na kvalite povrchovej vrstvy a charaktere pórovitého systému, pretože od toho sa odvíja rýchlosť prenikania agresívnych látok z vonkajšieho prostredia do štruktúry betónu, čím sa ovplyvňuje aj rýchlosť degradácie materiálu a jeho trvanlivosť.

Povrchovú vrstvu betónu môžeme definovať ako vrchnú vrstvu betónu v hrúbke od 20 do 50 mm. Jej charakteristickou vlastnosťou je menší obsah hrubého kameniva a naopak zvýšené množstvo cementového kameňa, tvoreného jemnými frakciami kameniva a hydratovaným cementom a znížený obsah pórov oproti vnútornej vrstve betónu. Toto platí, keď hovoríme o povrchovej vrstve na hornej strane konštrukcie napr. pri doskách, podláh. Pri stĺpoch tvoria povrchovú vrstvu aj bočné strany [28].

Vzhľadom k tomu, že povrchová vrstva je najexponovanejším, a tým aj najzaťaženejším miestom konštrukcie, nedochádza k rovnomernej distribúcii napätia po celom priereze, ale napätie sa sústreďuje na najslabšie miesta v konštrukcii pozdĺž trhliniek a pórov. Vznikajú väčšinou ťahové napätia, ktoré keď prekročia únosnosť materiálu, vznikajú trhliny v betóne, ktoré tvoria nové prístupové cesty pre prenikanie agresívnych médií do konštrukcie. Takto dochádza k chemicko-fyzikálnym dejom, ktoré spôsobujú degradáciu [28].

Medzi najvýznamnejšie činitele, ktoré zhoršujú kvalitu povrchovej vrstvy, patrí voda, sezónne výkyvy teplôt, striedavé zmrazovanie a rozmrazovanie, zmeny relatívnej vlhkosti a koncentrácia škodlivých látok v ovzduší alebo vode.

3.5.2 Permeabilita

Z hľadiska trvanlivosti je permeabilita veľmi dôležitá, pretože od nej závisí pohyb vody v betóne (pri striedavom zmrazovaní a rozmrazovaní, vysušaní a nasakovaní) a rýchlosť prenikania vody, vodnej pary a plynov, ktorá môže obsahovať agresívne látky.

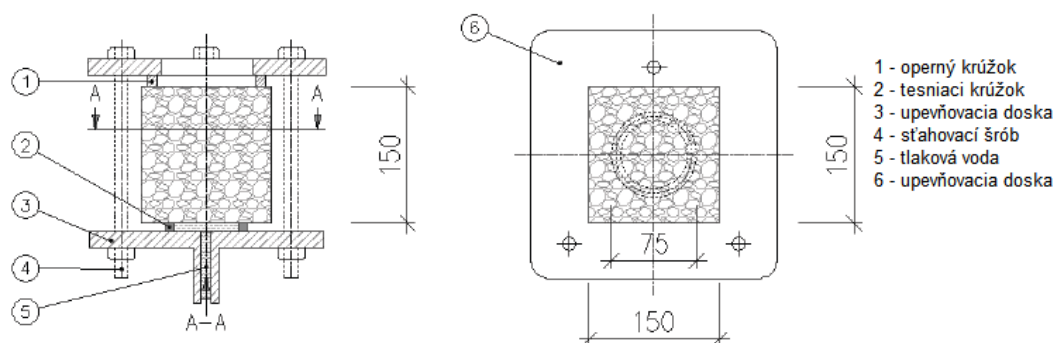
Tento pojem sa môže nesprávne zameniť s pórovitosťou betónu, sú to ale dve odlišné vlastnosti. Pórovitosť definuje, aký obsah dutín a pórov sa nachádza v celkovom objeme materiálu, pričom nemusia byť vzájomne pospájané, a teda nemusia dovoliť prechod kvapaliny alebo plynu. Permeabilita betónu je definovaná niekoľkými vlastnosťami, ktoré charakterizujú prenikanie vody pórovitou štruktúrou cementového kameňa (vodotesnosť, vzlínavosť, nasiakavosť), prenikanie plynov (prievzdušnosť, difúzia vodných pár) a tiež tepelnou vodivosťou a elektrickou vodivosťou betónu. Permeabilitu ovplyvňuje kvalita cementového kameňa a existencia trhlín medzi kamenivom a cementovým tmelom. Tak napríklad, hoci cementový gél má pórovitosť 28 %, jeho súčiniteľ permeability je len $7 \cdot 10^{-12}$ m/s [1, 2].

Existuje mnoho metód, ktoré permeabilitu hodnotia alebo ktoré s ňou súvisia. V zásade sa zakladajú na prieniku vody alebo plynu cez betón alebo prechode elektrického náboja cezeň. Nasledujúca kapitola popisuje vybrané metódy.

3.5.3 Možnosti hodnotenia priepustnosti

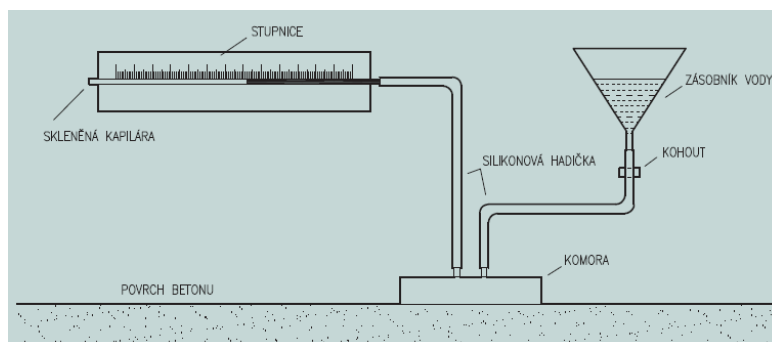
Pretože najčastejšou príčinou zníženia trvanlivosti býva prenikanie agresívnych médií do betónu, na posúdenie váhy sa uskutočňujú merania tzv. rýchlou skúškou permeabilitychloridových iónov. Táto veličina sa udáva v coulomboch (C) a vyjadruje celkové množstvo elektrického náboja, ktoré prejde vzorkou betónu pri predpísaných podmienkach [1].

Ďalej možno uskutočňovať meranie hĺbky priesaku tlakovou vodou v zatvrdnutom betóne. Princíp merania spočíva v tom, že na vzorku betónupôsobí voda pod tlakom 500 ± 50 kPa počas 72 ± 2 hod. Po tejto dobe sa vzorka rozlomí v smere pôsobenia vody a meria sa najväčšia hĺbka priesaku s presnosťou na 1 mm [29].



Obr. 3.5.3.1 Príklad usporiadania skúšky [30]

Ďalšia permeačná metóda, ktorou môžeme zistiť (počiatočnú) krátkodobú nasiakavosť je metóda Initial surface absorption test (ISAT). Zisťuje sa množstvo pohltenej vody povrchovou vrstvou betónu za jednotku času pri konštantne pôsobiacom tlaku a vody. Princíp je zrejmý z obr. 3.5.3.2. Táto metóda je používaná napr. pri kontrole kvality povrchu urýchľovane tvrdnúceho betónu prefabrikovaných dielcov [28].



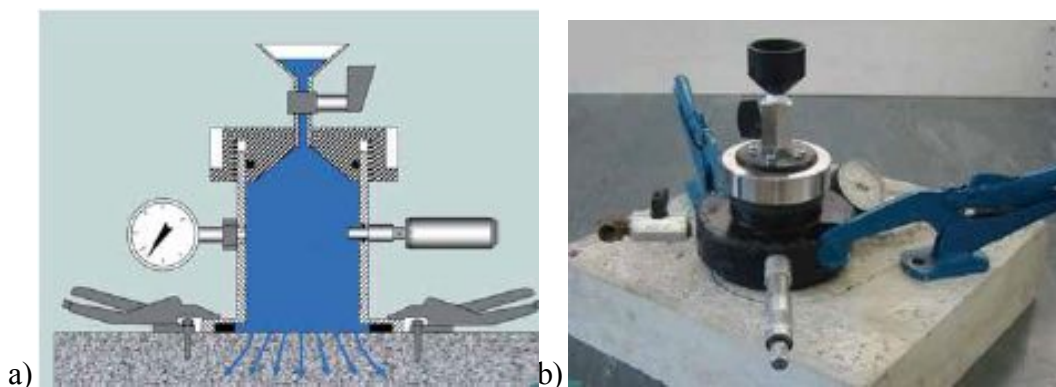
Obr. 3.5.3.2 Schéma metódy ISAT [28]

Okrem zmienených metód možno priepustnosť hodnotiť aj priamo prístrojom Torrent permeability tester (TPT). Prístroj pracuje na princípe vytvorenia vákua v betóne vyvodeného vákuovou pumpou a meria sa prietok vzduchu z povrchovej vrstvy betónu cez dvojkomorovú bunku daný znižovaním hodnoty vákua pre stanovenú hodnotu. Z nameraného času a tlaku vzduchu sa vypočíta hodnota súčiniteľa priepustnosti pre vzduch a hĺbka prieniku vákua. Výhodou TPT prístroja je, že sa tieto výpočty dejú softwareovo a metóda je vhodná pre meranie priamo na stavbe. Drobnou nevýhodou merania je nepresnosť spôsobená povrchovou vlhkosťou. Meranie trvá relatívne krátko 2 – 12 minút [28, 31].



Obr. 3.5.3.3 Torrent permeability tester [31]

Ďalší spôsob hodnotenia kvality povrchových vrstiev je stanovením priepustnosti povrchových vrstiev pomocou prístroja Germann water permeation test (GWT). Prístroj pracuje na princípe merania rýchlosti prietoku tlakovej vody štruktúrou povrchovej vrstvy v čase (obr. 3.5.3.4) [28].



Obr. 3.5.3.4 German water permeation test

a) schéma, b) skúšobné zariadenie [28]

Ide o tok kvapaliny v nasýtenom prostredí. Z doby prietoku vody danou plochou, zo zvoleného tlaku vody a objemu zatvrdnutého cementového tmela k celkovému objemu betónu sa na základe Darcyho zákona vypočíta súčiniteľ priepustnosti betónu. Na základe tejto veličiny sa potom určí súčiniteľ vnútornej priepustnosti k_T [m^2]. Hodnota vnútornej priepustnosti povrchovej vrstvy je v rade štandardov európskych noriem považovaná za hodnotiace kritérium pre posúdenie trvanlivosti stavebných betónov [28].

Tab. 3.1 Hodnotenie kvality krycej vrstvy podľa k_T [28]

Kvalita rycej vrstvy	Index	k [10-16 m ²]
Veľmi zlá	5	>10
Zlá	4	1 - 10
Stredná	3	0,1 - 1
Dobrá	2	0,01 - 0,1
Veľmi dobrá	1	< 0,01

3.5.4 Korózia

➤ Chemická korózia

Pre betón je najnebezpečnejšia. Vždy prebieha v prítomnosti vody, ktorá sa vyskytuje vo forme dažďa, tečúcej vody, vodnej pary apod. Najviac korózia napáda cementový kameň, ktorý vzniká hydratáciou slinkových materiálov.

Koróziu možno hodnotiť podľa Moskvina, ktorý ich rozdeľuje do troch skupín (korózia 1.typu, 2.typu, 3.typu) na základe procesov, ktoré prebiehajú s cementom.

Volženskij uvádza Kindovu klasifikáciu procesov korózie v závislosti od charakteru agresívneho prostredia [1]:

- **korózia vyluhovaním spojiva** – deje sa na princípe toho, že voda presakuje betónom a vynáša rozpustné zložky spojiva – Ca(OH)_2 . Viditeľne sa prejavuje tvorbou karbonátu bielej farby na povrchu betónu, takto vznikajú tzv. výkvety (CaCO_3) [32],



Obr. 3.5.4.1 Presakovanie vlhkosti škrupinou chladiacej veže, kde na vonkajšom povrchu vznikajú výkvety [32]

- **kyselinová korózia** – vzniká pôsobením rôznych kyselín, ktoré reagujú s Ca(OH)_2 a prípadne inými zložkami betónu,
- **uhličitá korózia** – charakterizuje pôsobenie agresívneho oxidu uhličitého CO_2 nachádzajúceho sa vo vode na cementový kameň,
- **síranová korózia** – soli betón nedegradujú, avšak roztoky solí reagujú s jeho zložkami, najmä s cementom. Najviac sa v praxi stretávame so síranom sodným, draselným, vápenatým napr. v pôde, odpadových vodách,
- **horečnatá korózia** - nastáva pri pôsobení horečnatých solí okrem síranu horečnatého MgSO_4 , síranohorečnatú koróziu cementového kompozitu spôsobuje práve MgSO_4 ,
- **ďalšie druhy korózie** – pôsobením roztokov anorganických zlúčenín napr. síranom hlinitým, síranom amónnym a korózia organickými látkami, ako napr. kyselina mravčia, octová.

➤ Fyzikálna korózia

K fyzikálnym činiteľom, ktoré spôsobujú koróziu cementových kompozitov, patrí najmä ich vysušanie a vlhčenie, ktoré je sprevádzané ich zmrašťovaním a napučiavaním, usadzovanie a kryštalizácia solí v pórovom systéme, striedavé zmrazovanie a rozmrazovanie, pôsobenie vysokých teplôt.

• Striedavé zmrazovanie a rozmrazovanie

Pri striedavom zmrazovaní a rozmrazovaní sa betón nasiaknutý vodou často poškodzuje. Keď sa nasiaknutý betón vystaví teplote nižšej ako 0 °C, väčšina vody hneď nezamrzne. Zapríčiňuje to veľkosť pórov. V kapilárach s priemerom 10 nm voda zamrzá pri teplote -5°C, v póroch s priemerom 3,5 nm až pri -20°C. V neprevzdušnenom cementovom kameni zmrazovanie spôsobuje veľké rozpínanie, ktoré vedie k vzniku vnútorných ťahových napätí a trhlín. V prevzdušnenom cementovom kameni nastáva na začiatku malá expanzia a počas zmrazovania sa uskutočňuje zmrašťovanie [1].

• Kryštalizácia solí

Je známe, že kryštalizácia síranových solí v jeho pórovom systéme spôsobuje degradáciu. Dochádza k nej vtedy, keď je betón v kontakte s vodou, ktorá obsahuje veľké množstvo rozpustených solí. Roztoky soli prenikajú do cementovej matrice a pri odparení vody koncentrácia roztokov narastá. Po dosiahnutí nasýteného stavu sa z nich začnú vylučovať kryštáliky, ktoré vyplňajú existujúce póry. Tento proces sprevádza účinok veľkých kryštalizačných tlakov na steny pórov, čo môže spôsobiť vznik trhlín, prípadne betón porušiť. S týmto problémom sa stretávame pri konštrukciách, ktoré sú v kontakte s kolísajúcou hladinou spodných vôd s vysokým obsahom soli. Problém možno riešiť utesnením alebo izolovaním betónu proti prenikaniu médií do kompozitu a z neho [1].

➤ Biologická korózia

Je najmenej obvyklým, dalo by sa povedať, že skôr ojedinelým spôsobom degradácie betónu. Spôsobujú ju živé mikroorganizmy. Ich výskyt a množenie závisí na viacerých faktoroch, a to vlhkosti, teplote a pH prostredia, prítomnosti kyslíka, znečisťujúcich látok v ovzduší apod.

Koróziu betónu spôsobujú hlavne sírne a nitrifikačné baktérie, s ktorými sa môžeme stretnúť napr. v chlievoch. Na povrchu betónu sa môžu vyskytovať plesne, tie však možno označiť len ako estetickú vadu, k porušeniu betónu ich vplyvom dochádza len výnimočne. Vo vlhkom prostredí môžu na betóne rásť lišajníky, ktoré obsahujú mnoho vody meniacej sa v mrazivom počasí na ľad, a tým poškodzujú povrch betónu. Riasy rastú na konštrukciách pod vodnou hladinou alebo v prostredí s vysokou vlhkosťou a betón môžu rozrušovať mechanicky vytváraním napätia v trhlinách alebo chemicky tvorbou organických zlúčenín [1, 3].

➤ **Korózia výstuže**

Keď je betón nenarušený, má $\text{pH} \approx 13$ a výstuž je chránená tzv. pasivačnou vrstvou na povrchu ocele. Pri narušení pasivačnej vrstvy nastáva korózia. Hlavnými príčinami porušenia pasivačnej vrstvy je karbonatácia betónu alebo jeho kontaminácia s chloridmi (napr. rozmrazovacie soli) [32].

Korózia výstuže v betóne prebieha v zásade ako rovnomerná (plošná) alebo jamkovitá. Plošná korózia je spájaná s karbonatáciou betónu, jamkovitá s chloridmi iniciovanou koróziou [28].

Korozívny proces možno rozdeliť na aktívne a pasívne štádium. Aktívne štádium je obdobie, počas ktorého prebieha korózia výstuže, jeho hlavným parametrom je rýchlosť korózie V_{corr} , ktorá počas aktívneho štádia nie je konštantná. Počas pasívneho štádia prenikajú oxid uhličitý CO_2 , resp. chloridové ióny Cl^- smerom k výstuži. Pasívne štádium je ukončené, ak povrch výstuže je depasivovaný karbonatáciou betónu alebo difúziou chloridov [28].

Nebezpečenstvo korózie ocelovej výstuže možno znížiť použitím zodpovedajúcej krycej vrstvy, použitím vysokokvalitných nepriepustných betónov s nízkym vodným súčiniteľom, použitím inhibítorov výstuže, použitím nehrdzavejúcej ocele.

➤ Karbonatácia betónu

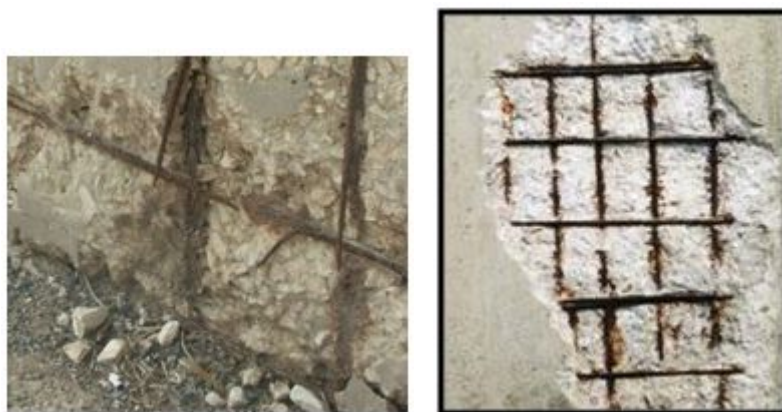
Je prejavom tzv. „starnutia“ betónu, ktorý je sústavne napádaný oxidom uhličitým z ovzdušia. Síce je obvyklý obsah CO_2 vo vzduchu je 0,03 % objemu (60 mg.m^{-3}), v priemyselných oblastiach býva násobne vyšší [2].

Nový betón má prirodzenú ochranu ocelových výstuží pred koróziou. V bezporuchovom stave je betón alkalický s $\text{pH} = 12,5$ (neskarbonatovaný) a ocelová výstuž, ktorá v ňom je uložená, je v zásaditom prostredí výborne chránená proti pôsobeniu vonkajších vplyvov a korózii. Problém nastáva v okamihu, keď sa betón vplyvom okolitého prostredia a atmosférických podmienok stáva viac poréznym. Neošetrený betónový povrch má vďaka mikropórom tendenciu sať vzdušnú vlhkosť do svojej vnútornej štruktúry. Oxid uhličitý CO_2 , preniká zároveň s vlhkosťou do betónu, napáda korózne ocelovú výstuž v železobetóne a konečným produktom je karbonát a predovšetkým výrazné zníženie pH betónu, ktoré spôsobuje karbonatáciu. Proces karbonatácie sa dá potom popísať jednoduchou rovnicou [33].



Proces karbonatácie prebieha vo viacerých časových úsekoch, s rozdielnym stupňom karbonatácie a s rozdielnou intenzitou pôsobenia na betón. Rýchlosť karbonatácie za rok je v rozmedzí od 0,1 do 1,0 mm [1].

Skúšanie karbonatácie prebieha tak, že rozlomená vzorka betónu sa postrieka roztokom fenolftaleínu. Zkarbonatovaná vrstva betónu sa vizuálne nezmení, betón, ktorý nie je napadnutý karbonatáciou, sa sfarbí do ružova [3].



Obr. 3.5.4.2 Karbonatácia betónu [33]

3.5.5 Opotrebenie

Betón je v určitých situáciách vystavený opotrebeniu, čo môže niekedy spôsobiť až prevádzkové problémy. Opotrebovanie betónu vždy súvisí so stratou hmotnosti obrusom či oterom, eróziou alebo kavitáciou.

➤ **Obrusnosť**

Ide o proces spojený s opakovaným obrusom alebo oterom povrchu, s ktorým sa môžeme stretnúť na dopravných komunikáciách, letiskových plochách, priemyselných podlahách apod. Betón je náchylnejší na obrus, hlavne keď má cementový kameň vysokú pórovitosť a nízku pevnosť a keď bolo do betónu použité kamenivo s nízkou odolnosťou proti opotrebovaniu [1].

Skúška odolnosti proti obrusu sa robí podľa normy, kde sa obrusnosť vypočíta na základe úbytku hmotnosti vysušeného betónu pred brúsením a po ukončení skúšky.

➤ **Erózia**

Ide o opotrebovanie betónu, ktoré je spôsobené kvapalinami obsahujúcimi pevné častice (suspenzie). S týmto procesom sa môžeme stretnúť pri vodných stavbách, ako napr. kanále, potrubia, priepady. Závisí predovšetkým od vlastností betónu, t. j. jeho pórovitosti a pevnosti, od množstva a vlastností pevných častíc, ktoré sa nachádzajú v pohybujúcej sa kvapaline, a to od ich veľkosti, tvaru, hustoty a tvrdosti, ako aj rýchlosti ich pohybu [1].

Erozívne vplyvy možno obmedziť ošetrením betónu ochrannými nátermi, ktoré zamedzia prenikaniu vody, oxidu uhličitého a ďalších látok do jeho vnútornej štruktúry. Ochranné nátery bývajú na báze organických spojív ako polymerátov, alkydov, epoxidov, polyuretanov alebo akrylátov [34].

➤ **Kavitácia**

Je to poškodenie betónu nárazom pri náhlej zmene smeru rýchloprúdiacej kvapaliny. Vzniká pri prúde vody s rýchlosťou viac ako 12 m/s. Stretávame sa s ním v priepadoch a vzdúvadlách priehrad a zavodňovacích zariadeniach [1, 32].

Povrch betónu postihnutý kavitáciou je nepravidelný, vrúbkovaný a má jamky v protiklade s vyhladeným povrchom betónu, na ktorý pôsobí prúdiaca voda obsahujúca jemné pevné zložky. Betón odolný proti kavitácii musí mať vysokú pevnosť, nízky vodný súčiniteľ a povrchová vrstva má obsahovať kamenivo s veľkosťou maximálneho zrna 16 mm [1].

3.6. Odtrhová skúška

V súčasnosti neexistuje žiadna normovaná metóda na stanovenie trvanlivosti betónu ani kritérium, na základe ktorého by bolo možné posudzovať životnosť. Existuje však niekoľko metód, ktorými môžeme skúšať odolnosť povrchovej vrstvy proti pôsobeniu vonkajších vplyvov a boli rozobraté v kapitole 3.5.3.

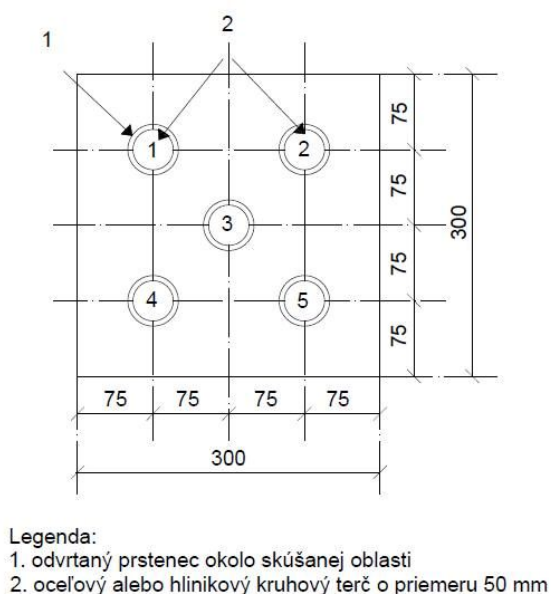
Odtrhová skúška sa vyhodnocuje podľa normy ČSN 73 1318 [35]. Tiež existuje aj norma ČSN EN 1542 (73 2115) [36], ktorá s ňou súvisí.

Pri skúške sa používajú telesá celé a neporušené. Za neporušené sa považujú také, ktorých žiadna prierezová plocha nie je oslabená o viac ako 2 %. Odvrtanie jadra sa robí jadrovou vŕtačkou s diamantovou korunkou. Veľkosť návrtu je definovaná maximálnou veľkosťou zrna kameniva v betóne. Použitím kameniva s frakciou do 16 mm je minimálny priemer návrtu 50 mm. Pri vŕtaní sa skúšobné teleso aj vŕtačka upevnia tak, aby sa nemohli pohybovať alebo uvoľniť. Vŕtačka nesmie vykazovať výrazné vibrácie a nesmie umožňovať stranový pohyb jadrového vrtáku. Vŕta sa diamantovým jadrovým vrtákom, ktorý s povrchom zvierá uhol $\pm 90^\circ$. Vŕtanie prebieha pri tečúcej vode, ktorá odplavuje odvrátený betón. Hĺbka návrtu musí byť rovná minimálne polovici priemeru návrtu [35, 36].



Obr. 3.6.1 Odvrtávanie jadra pri tečúcej vode

Odtrhový terč sa podľa potreby očistí obrúsením, potom sa odmastí a osuší sa tá strana, na ktorú sa bude nanášať lepidlo. Na povrch skúšobného miesta sa nanesie tenká vrstva lepidla tak, aby vznikla súvislá vrstva medzi kruhovým terčom a betónom. Povrch musí byť pred lepením terčov očistený oceľovou kefou. Do medzery vytvorenej jadrovým vrtákom nesmie preniknúť žiadne lepidlo. Kruhový terč sa položí na povrch odvrtaného miesta sústredene s osou jadra. Potom sa pritlačí na terč tak, aby sa odstránil vzduch, a všetko vytečené lepidlo sa ihneď starostlivo odstráni. Následne sa nalepené terče sa nechajú vytvrdnúť 24 hodín. V prípade potreby možno použiť aj rýchlotuhnúce lepidlo, ktoré je zatvrdnuté už po niekoľko pár minútach [36, 37].



Obr. 3.6.2 Náčrt skúšobného telesa a znázornenie polohy kruhových terčov [36]

Zariadenie pre odtrhovú skúšku a jeho príslušenstvo sa použije podľa návodu ako uvádza výrobca. Musí sa umiestniť sústredene nad kruhový terč tak, aby uhol s jeho povrchom bol $\pm 90^\circ$. Zaťažovacia sila sa zvyšuje plynule a rovnomerne rýchlosťou $0,05 \pm 0,01$ MPa/s až do porušenia. Veľkosť zaťaženia pri porušení sa zaznamená [35, 36].



Obr. 3.6.3 Skúšobné zariadenie pre odtrhovú skúšku DYNA Z15

Na odtrhnutom vzorku sa merajú dve navzájom kolmé hodnoty naprieč jadra. Meria sa posuvným meradlom s presnosťou 0,1 mm. S nameraných hodnôt priemeru sa potom stanoví stredný priemer plochy porušenia skúšobného telesa [35, 36].



Obr. 3.6.4 Meranie priemerov plochy porušenia na skúšobnom vzorku

Vyhodnotenie dosiahnutej pevnosti v ťahu sa prevedie podľa vzorca a výsledné hodnoty R_t sa zaokrúhľujú na 1 desatinné miesto.

$$R_t = \frac{F}{A} \quad (10)$$

kde R_t je pevnosť v ťahu (MPa),

F je najväčšia dosiahnutá sila (N),

A je vypočítaná veľkosť plochy prierezu zo zmeraného priemeru návrhu v mieste roztrhnutia (mm^2) podľa ČSN 73 1311.

4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Praktická časť tejto práce je venovaná sledovaniu ťahových pevností povrchových vrstiev betónu s rôznym zložením. Zameriava sa na to, ako vplýva zvyšovanie dávky cementu, plastifikačnej prísady a prímеси na pevnosť jeho povrchovej vrstvy, resp. pevnosť betónu v ťahu. Je snaha zistiť, či pomocou vlastností pevnosti v ťahu povrchovej vrstvy možno hodnotiť kvalitu povrchovej vrstvy betónu, a teda jeho trvanlivosť. Práca skúma, či doteraz známe metódy nie je možné čiastočne nahradiť prípadne doplniť práve touto skúškou.

V experimente sa pevnosť v ťahu zisťuje pomocou odtrhovej skúšky na betónových skúšobných telesách. Skúšky boli vykonané na 11 betónoch s rôznymi receptúrami, ktorých dávkovanie jednotlivých zložiek popisuje tab. 4.1.1. Záver kapitoly sa zaoberá spracovaním výsledkov skúšky tabelárne a graficky.

4.1 Výroba čerstvého betónu

Bolo namiešaných celkovo 11 betónových zámesí, ktorých jednotlivé receptúry sa od seba odlišovali množstvom dávky cementu a plastifikačnej a prevzdušňovacej prísady tab. 4.1.1.

Pre všetky betóny bol použitý rovnaký cement CEM I 42,5R. Plastifikačná prísada bola primiešaná iba do niektorých betónov, a to superplastifikátor Sika ViscoCrete 4035. Do posledných dvoch betónov bola ešte navyše pridaná aj prevzdušňovacia prísada.

Kamenivo do betónových zámesí pochádzalo z prírodných zdrojov a bolo zastúpené v troch rôznych frakciách. Drobné kamenivo frakcie 0 – 4 mm pochádzalo z pieskovne Bratčice, frakcia 4 – 8 mm a frakcia 8 – 16 mm z Olbramovic. Dbalo sa na to, aby bolo kamenivo a voda boli nadávkované do všetkých betónov v približne rovnakom množstve.

Betón bol miešaný na betonárke a každého druhu bolo namiešaných minimálne 400 l. Na odtrhovú skúšku boli vyrobené skúšobné telesá, kvádre, o rozmeroch 300 x 300 x 150 mm. Okrem týchto skúšobných telies boli vyrobené aj skúšobné kocky, trámce, valce, na ktorých sa prevádzali aj iné skúšky.

Na betónoch sa tiež zisťovali vlastnosti čerstvého betónu, a to objemová hmotnosť, sadnutie kužeľa, rozliatie a obsah vzduchu, ktorých hodnoty popisuje tab. 4.1.2. Všetky tieto skúšky prevádzané na betónoch sú aj zdokumentované v prílohe 1.

Tab. 4.1.1 Receptúry skúšaných betónov

Označenie receptúry betónu	Kamenivo [kg]			Cement [kg]	Voda [kg]	Plastifikačná prísada	Prevzdušňovacia prísada
	Bratčice 0 - 4	Olbramovice 4 - 8	Olbramovice 8 - 16	42,5 R		Sika ViscoCrete 4035	Sika LPS A 94
R	953	173	675	248	201	0	0
0/1	925	182	696	308	203	0	0
0/2	889	174	693	357	201	0	0
0/3	826	195	669	392	208	0	0
1/1	927	185	689	295	177	0,71	0
1/2	897	185	693	349	175	0,91	0
1/3	846	192	684	394	183	0,95	0
2/2	905	183	667	338	176	1,77	0
2/3	854	207	671	386	181	2,01	0
P2/2	850	312	526	335	164	1,7	0,76
P2/3	841	188	715	405	176	2,11	0,73

Tab. 4.1.2 Vlastnosti skúšaných betónov

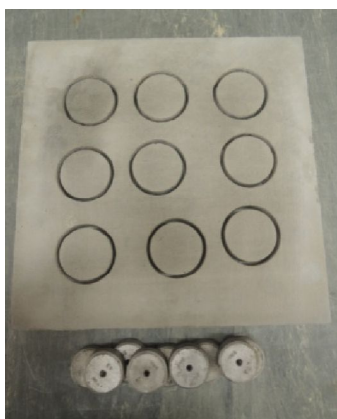
Vlastnosti	Označenie receptúry betónu										
	R	0/1	0/2	0/3	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
vodný súčiniteľ (skutočný):	0,75	0,61	0,53	0,50	0,55	0,46	0,43	0,48	0,44	0,45	0,40
obj. hm. čerstvého betónu [kg/m ³]	2 250	2 315	2 315	2 290	2 275	2 300	2 300	2 270	2 300	2 190	2 260
rozlitie [mm]	435	410	385	415	360	350	370	340	330	330	320
sadnutie [mm]	110	60	60	110	60	50	60	65	50	55	50
obsah vzduchu [%]	2,8	2,7	2,5	2,5	3,6	2,8	3,2	4,5	3,0	6,2	5,7
priemerná 28denná krychelná pevnosť v tlaku [MPa]	21,6	33,3	44,5	55,8	42,8	50,8	56,4	52,2	57,2	53,7	63,8

4.2 Mechanizmy a pomocné prostriedky

- diamantový jadrový vrták (diamond core drill and barrel) –slúži na odvrtnutie návrto (50 ± 0,1 mm) do betónového skúšobného telesa,
- kruhové terče (circular dollies) – boli použité hliníkové terče o priemere 50 mm a hrúbke 30 mm,
- rýchlotuhnúce dvojzložkové epoxidové lepidlo (rapid hardening two komponent epoxy adhesive) – terče boli lepené lepidlom Sikadur – 30 normal, pozostávajúcím zo zložky A a B, ktoré sa dávajú v pomere podľa návodu,
- zariadenie pre odtrhovú skúšku (pull of test equipment) – bol použitý odtrhový prístroj DYNA Z15. Skúšobné zariadenie bolo kalibrované,
- posuvné meradlo (vernier calipers) – pracovalo sa s digitálnym posuvným meradlom s presnosťou 0,001 mm. Meracie zariadenie bolo kalibrované.

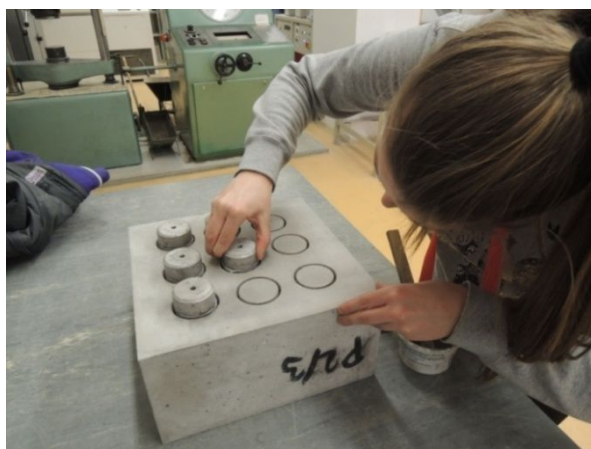
4.3 Priebeh skúšky

Experiment sa realizoval podľa skúšobného postupu popísaného v kapitole 3.6. Postupovalo sa podľa normy [35] a tiež aj podľa normy [36]. Návrty sa umiestňovali podľa normy [36], ale pre konkrétny experiment bolo umiestnenie mierne modifikované. V skúšobnom telese nebolo vyvrtaných 5 vrto, ako to popisuje norma, ale bolo prevedených 9 návrto do každej vzorky betónu obr.



Obr. 4.3.1 Modifikácia umiestnenia návrto na skúšobných vzorkách

Po nalepení skúšobných terčov na návrty a vytvrdnutí lepidla nasleduje samotná skúška odtrhu. Na každom skúšobnom mieste sa zaznamená sila pri porušení.



Obr. 4.3.2 Lepenie terčov, samotný priebeh odtrhu

4.4 Spracovanie výsledkov

Na všetkých skúšobných miestach bola na základe nameranej sily a plochy vypočítaná pevnosť v ťahu podľa vzorca 10. Priemerné hodnoty pevnosti v ťahu skúšaných betónov popisuje tab. 4.4.1.

Tab. 4.4.1 Priemerná pevnosť v ťahu povrchovej vrstvy

Označenie betónu	Vodný súčiniteľ w	Priemerná pevnosť v ťahu povrchovej vrstvy [MPa]	Smerodatná odchýlka [MPa]
R	0,75	2,6	0,61
0/1	0,61	1,7	0,18
0/2	0,53	2,1	0,26
0/3	0,50	4,1	0,38
1/1	0,55	3,7	0,36
1/2	0,46	3,6	0,29
1/3	0,43	3,7	0,53
2/2	0,48	3,5	0,36
2/3	0,44	4,2	0,40
P2/2	0,45	4,5	0,46
P2/3	0,40	3,6	0,85

Jednotlivé výsledky pre každú receptúru sú v prílohe 2. V prílohe 3 sú zdokumentované aj všetky skúšobné vzorky po odskúšaní (odtrhnutí).

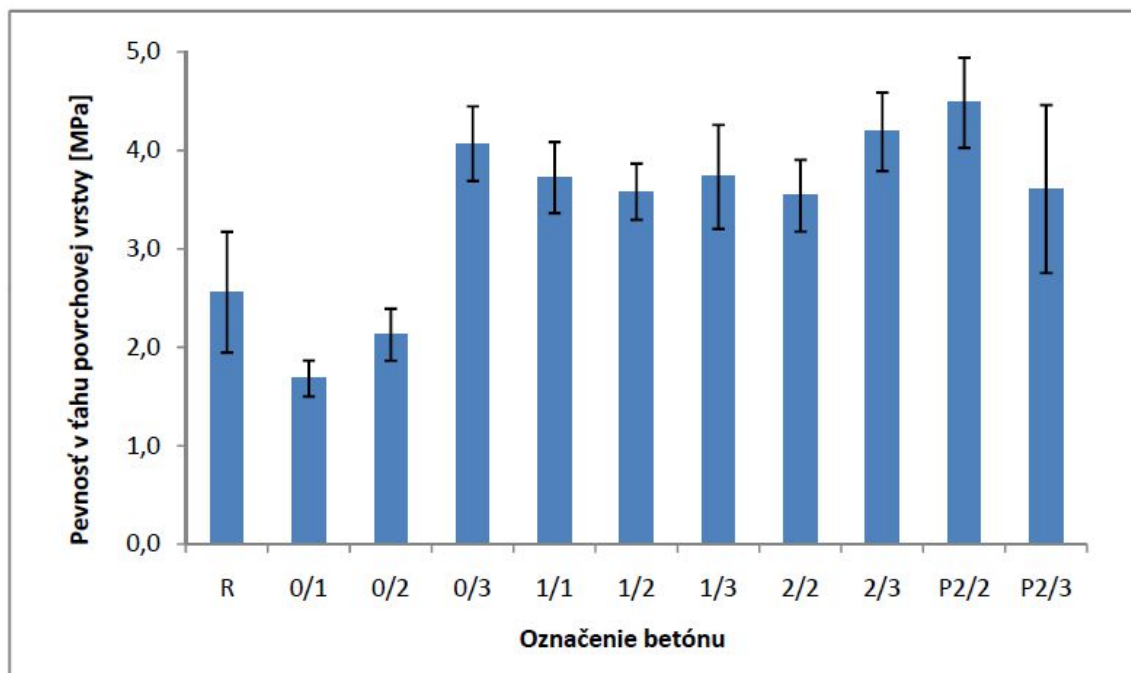
Pri skúške odtrhom došlo k rôznym typom porušenia. Spôsob porušenia každej vzorky je popísaný v tabelárnom vyhodnotení v prílohe 2. Podľa normy [36] by sa miesta, kde došlo k abnormálnemu porušeniu mali vyradiť. Abnormálne porušenie je také, kde dôjde k predčasnemu porušeniu v lepidle (tj. keď povrch obsahuje časť porušenia Y alebo Y/Z). K vyradeniu však nedošlo, pretože vyradenie vzoriek nemá vplyv na priemernú pevnosť. Stanovenie plochy porušenia sa robí vizuálnym posúdením. Existujú tieto typy porušenia:

A: kohézne porušenie vnútri betónového podkladu.

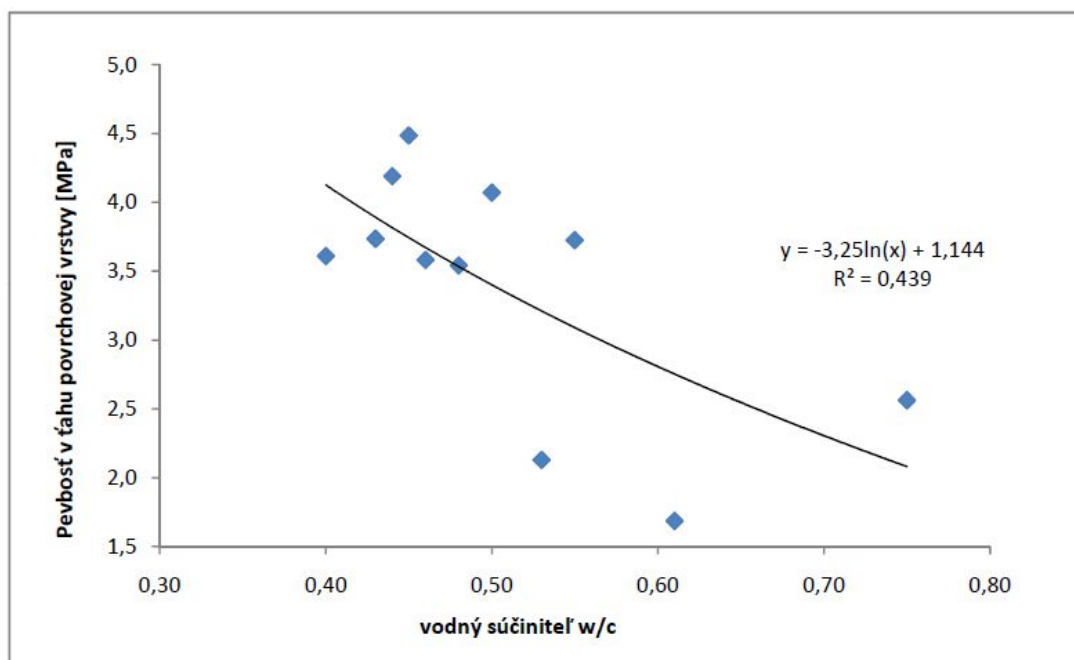
Y: kohézne porušenie v lepidle.

A/Y: kohézne porušenie vnútri betónového podkladu a zároveň v lepidle.

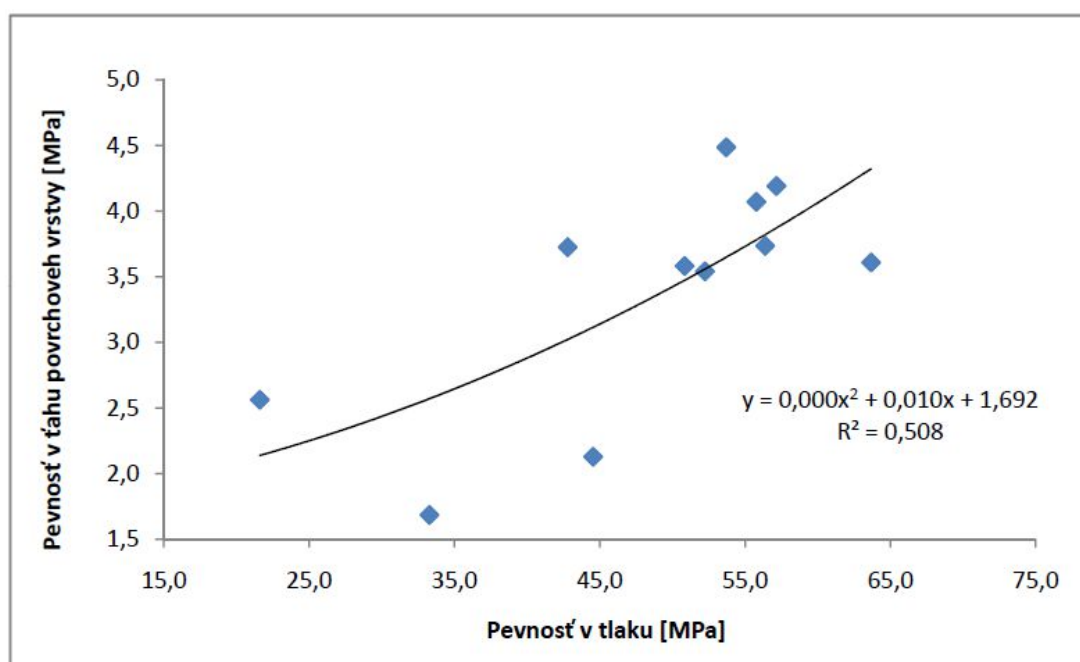
Y/Z: adhézne porušenie medzi lepidlom a kruhovým terčom (ktorý je Z).



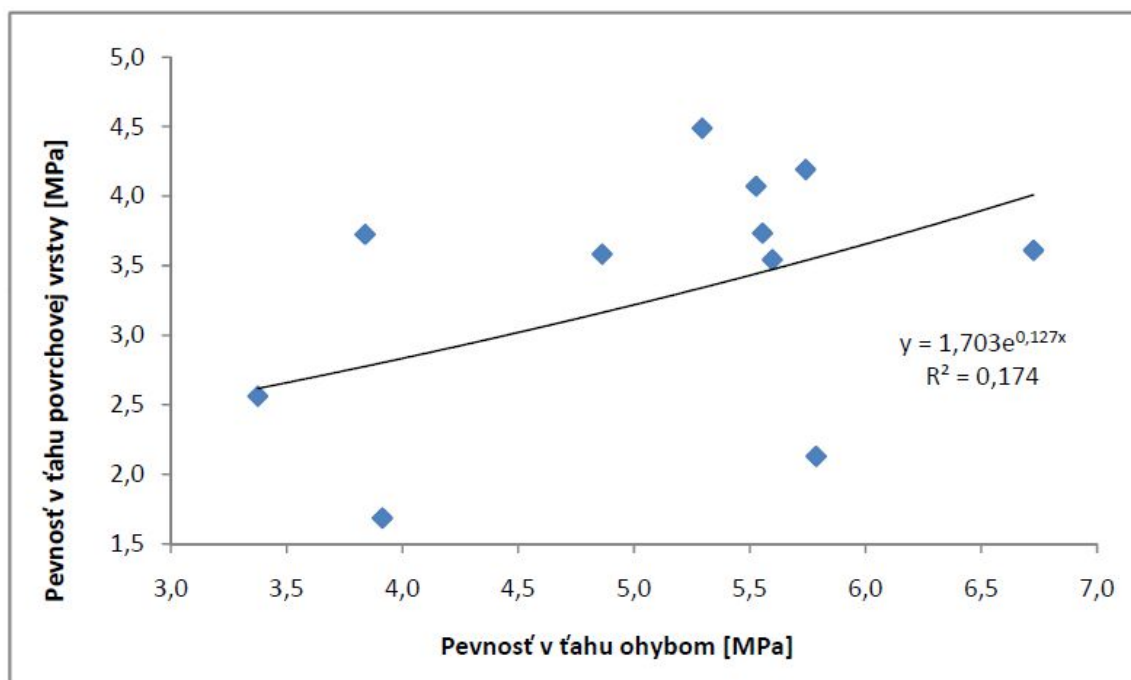
Graf 4.1 Priemerná pevnosť v ťahu povrchových vrstiev



Graf 4.2 Závislosť vodného súčiniteľa na pevnosti v ťahu povrchovej vrstvy



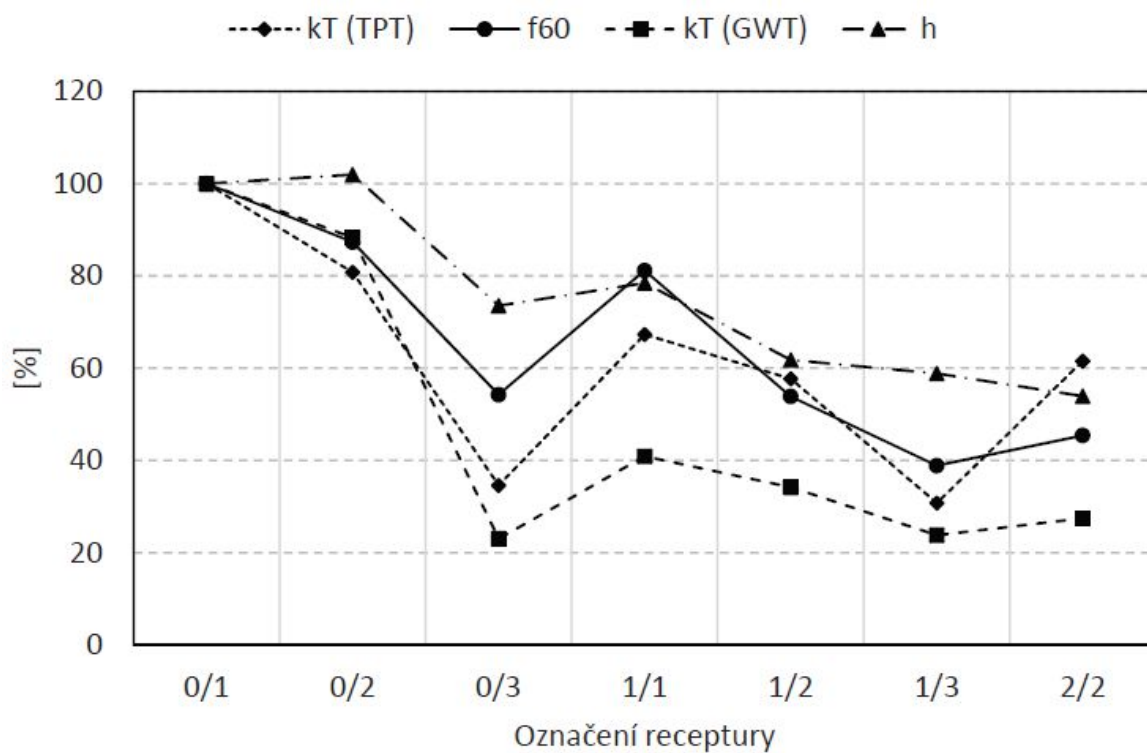
Graf 4.3 Závislosť pevnosti v tlaku na pevnosti v ťahu povrchových vrstiev



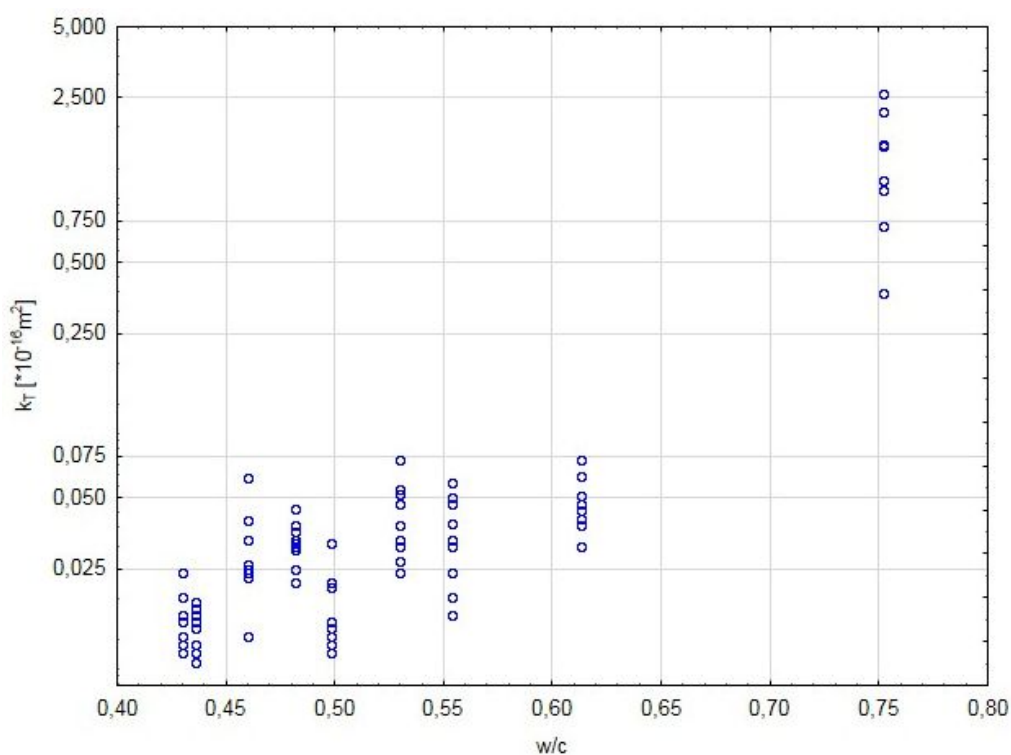
Graf 4.4 Závislosť pevnosti v ťahu ohybom na pevnosti v ťahu povrchových vrstiev

Nepodarilo sa preukázať, že by odtrhová skúška bola vhodná k hodnoteniu kvality povrchovej vrstvy.

Na betónoch boli zároveň prevádzané aj ďalšie trvanlivostné skúšky povrchovej vrstvy, a to hĺbka priesaku tlakovou vodou, TPT (testovanie pre vzduch), ISAT (testovanie pre vodu bez pôsobenia tlaku) a GWT (testovanie betónu pre vodu pod tlakom 0,02 MPa). Tieto súbežne prevádzané skúšky vykazujú lepšie výsledky ako skúšaná odtrhová skúška. Porovnanie ako sú tieto metódy spolu citlivé znázorňuje graf 4.5 [30].

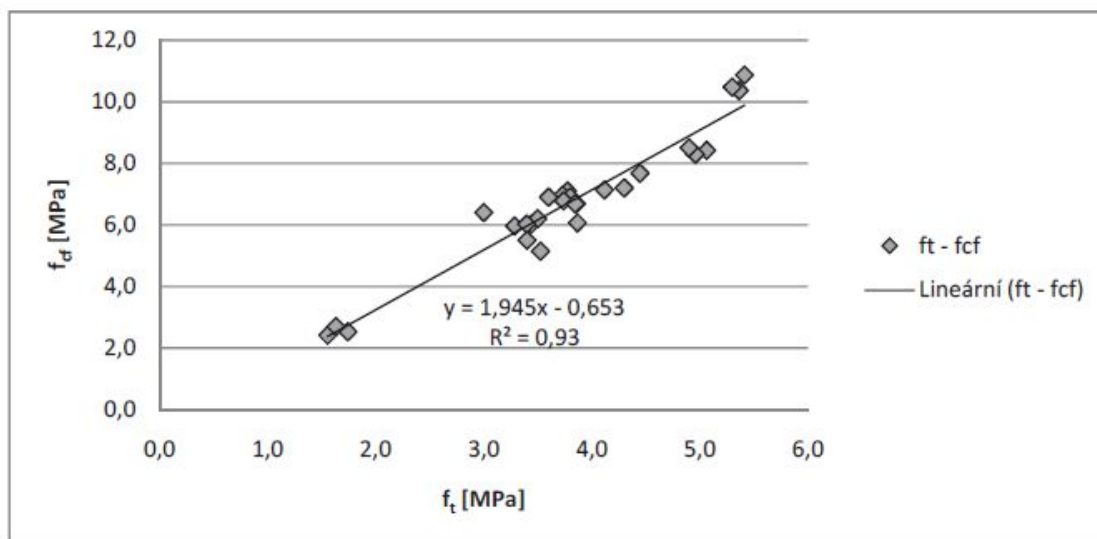


Graf 4.5 Znázornenie percentuálneho poklesu všetkých sledovaných veličín vzhľadom k hodnotám nameraným na receptúre s označením 0/1 [30]



Graf 4.6 Závislosť k_T (TPT) na vodnom súčiniteli [30]

Podobným témam sa zaoberala aj bakalárska práca [38], ktorá preukázala (prostý ťah, ťah ohybom) vychádzajú lepšie ako skúmané odtrhy.



Graf 4.7 Závislosť pevnosti v ťahu za ohybu na pevnosti v prostom ťahu

Témou ťahových pevností sa podrobne zaoberá publikácia [39], kde už boli preukázané vzťahy a závislosti medzi jednotlivými ťahovými parametrami.

5 ZÁVER

Ciele práce boli splnené. Podstatou práce bolo zistiť, či je odtrhová skúška tzn. pevnosť v ťahu povrchovej vrstvy vhodná k skúšaniam ako doplnková metóda pre už zavedené (TPT, GWT, apod.).

Na základe uskutočnených experimentov a vyhodnotení bolo zistené, že odtrhová skúška nevytvorí veľa o kvalite, a to ani vzhľadom k vodnému súčiniteľu. Podľa neho by totiž s klesajúcim vodným súčiniteľom mala rásť kvalita betónu. Zrealizovaná odtrhová skúška a jej výsledky boli ďalej porovnané s pevnosťou v tlaku a pevnosťou v ťahu ohybom. Z grafov je zrejmé, že medzi týmito veličinami nebola v rámci experimentu preukázaná závislosť, z čoho sa javí, že odtrhy pravdepodobne nie sú príliš vhodné k hodnoteniu kvality betónu (či jeho povrchovej vrstvy). Súbežne prevádzané skúšky na betónoch (hlbka priesaku tlakovou vodou, TPT, GWT, ISAT) sú pre hodnotenie trvanlivosti vhodnejšie.

V tomto prípade je skúška pomerne citlivá na hĺbku návrtníka. Hoci sa v norme uvádza hĺbka návrtníka 15 ± 5 mm, čo bolo v experimente dodržané, je ale veľký rozdiel či bude hĺbka v jednotlivých návrtoch 10 alebo 20 mm.

Nepodarilo sa preukázať, že by bola odtrhová skúška vhodná k hodnoteniu kvality povrchovej vrstvy.

6 ZOZNAM POUŽITÝCH NORIEM, LITERATÚRY A WWW ODKAZOV

- [1] BAJZA Adolf, ROUSEKOVÁ Ildikó. *Technológia betónu*. 1. vyd. Bratislava: JAGA, 2006. 190 s. ISBN 80-8076-032-2.
- [2] PYTLÍK Petr. *Technologiebetonu*. 1. vyd. Praha: VUT v Brně, 1997. 346 s. ISBN 80-214-0779-4.
- [3] <http://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu>.
- [4] www.geologie.vsb.cz [online]. [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html>.
- [5] www.stavebnikomunita.cz [online]. [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://stavebnikomunita.cz/page/technologie-betonu-obsah>.
- [6] COLLEPARDI Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: ČKAIT, 2009. 344 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [7] ČSN EN 1008 (73 2028) Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu, 2003.
- [8] www.concrete.fsv.cvut.cz [online]. [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS_2012_prisady_primesi.pdf
- [9] www.asb-portal.cz [online]. [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-avyrobky/cihly-tvarnice/chemicke-prisady-do-betonu-amalt>.
- [10] www.concrete.fsv.cvut.cz [online]. [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: <http://concrete.fsv.cvut.cz/pomucky/down/BEK1SL3%20.pdf>
- [11] www.betonracio.sk [online]. [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: http://www.betonracio.sk/betonracio/images/stories/odborne_clanky/2002_3.pdf
- [12] www.mujbeton.cz [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.mujbeton.cz/konzistence-betonu>.
- [13] HUDOBA Igor. *Vysokohodnotný betón*. 1. vyd. Bratislava: STU, 2008. 163 s. ISBN 978-80-227-2836-2.

- [14] ČSN EN 12350-2 (731301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím, 2009.
- [15] ČSN EN 12350-5 (731301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím, 2009.
- [16] ČSN EN 12350-4 (73 1301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 4: Stupeň zhutnitelnosti, 2009.
- [17] ČSN EN 12350-3 (731301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 3: Zkouška Vebe, 2009.
- [18] *www.stavebnikomunita.cz* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/vlastnosti-betonu>
- [19] *www.asb.sk* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.asb.sk/stavebnictvo/stavebne-materialy/beton/objemove-zmeny-betonu-vkonstrukciach-budov>
- [20] *www.drevostavby-rychle.cz* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.drevostavby-rychle.cz/cs/tepelna-vodivost-materialu-89.html>
- [21] *www.techmania.cz* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=323.
- [22] ČSN EN 12390-6 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles
- [23] *www.dk.spsopava.cz* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni_laborator/cviceni/33_zkouseni_ztvr_dleho_betonu_v_pricnem_tahu.pdf
- [24] ČSN EN 12390-5 Zkoušení z tvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles, 2009.
- [25] *www.fast10.vsb.cz* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi8/pevnostvtahuo_hybem.pdf

- [26] <http://www.betontks.cz> [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/index.php?sekce=0202&jazyk=cz&rocnik=2005&cislo=3>
- [27] <http://www.betontks.cz> [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/index.php?sekce=0202&jazyk=cz&rocnik=2008&cislo=2>
- [28] <http://www.betontks.cz> [online] [cit. 2015-05-21] Dostupné z: <http://www.betontks.cz/index.php?sekce=0202&jazyk=cz&rocnik=2012&cislo=3>
- [29] ŠMERDA Zdeněk a kol. *Životnost betonových staveb*. 1. vyd. Praha: ŠEL, 1999. 184 s. ISBN 80-902697-8-8.
- [30] *Trvanlivost 2014 sborník příspěvků*. 1. vyd. Brně: VUT v Brně, 2014. 80s. ISBN 978-80-214-5075-2.
- [31] www.proceq.com [online]. [cit.2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.proceq.com/products/concrete-testing/permeability-analysis/torrent.html>
- [32] www.concreate.fsv.cvut.cz [online]. [cit 2015-05-23] Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/~prochazka/YTBK/Prednaska_2_2014.pdf
- [33] www.reprof.eu [online]. [cit 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.reprof.eu/karbonatace-a-sanace-zelezobetonu-a126>
- [34] www.fn-nano.cz [online]. [cit 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.fn-nano.cz/ktery-vyrobek-potrebuji-/proti-erozi-betonovych-konstrukci/>
- [35] ČSN EN 73 1318 Stanovení pevnosti betonu v tahu, 1987.
- [36] ČSN EN 1542 (73 2115) Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou, 2000.
- [37] ROZSYPALOVÁ Iva. *Srovnání vybraných pevnostných tahových parametrů betonuů*. Brno, 2013. 80 s., 11 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Daněk, PhD.
- [38] POPOVICS Sándor. *Strenght and related properties of concrete a quantitative approach*. 1. vyd. United States of America: Drexel University, 1998. 535 s. ISBN 0-471-14903-9.

7 ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Vzhľadom na to, že niektoré skratky a symboly sú vysvetlené priamo pri uvedených vzorcoch, v zázname použitých symbolov znova nie sú uvedené.

VUT	Vysoké učení technické v Brně
FAST	Fakulta stavební
v	hmotnosť účinnej vody
c	hmotnosť cementu
L	súčiniteľ priestorového rozloženia vzduchových pórov
ČB	čerstvý betón
ψ	súčiniteľ utesnenia
E	modul pružnosti betónu
β	index spoľahlivosti
pf	pravdepodobnosť poruchy
ISAT	Initial surface absorption test
TPT	Torrent permeability tester
GWT	German water permeation test
k_T	súčiniteľ vnútornej priepustnosti

8 ZOZNAM OBRÁZKOV, TABULIEK, GRAFOV, VZORCOV, PRÍLOH

8.1 Zoznam obrázkov

- Obr.3.1.1.1** Schematické znázornenie zrnitosti kameniva
- Obr. 3.1.1.2** Schéma výroby cementu
- Obr. 3.1.4.1** Mikroskopická snímka vzorky prevzdušneného betónu
- Obr. 3.2.1.1** Princíp skúšky sadnutím kužeľa
- Obr. 3.2.1.2** Princíp skúšky rozliatím
- Obr. 3.2.2.1** Vzťah medzi napätím a deformáciou
- Obr. 3.2.2.2** Priebeh dotvarovania obyčajného betónu
- Obr. 3.3.1** Skúšobné telesá z betónu
- Obr. 3.3.1.1** Princíp skúšky pevnosti betónu v prostom ťahu
- Obr. 3.3.2.1** Princíp skúšky pevnosti betónu v priečnom ťahu
- Obr. 3.3.2.2** Skúšanie na valcových a kockových (hranolových) skúšobných telesách
- Obr. 3.3.3.1** Usporiadanie zaťažovania skúšobného telesa (zaťažovanie dvoma bremenami)
- Obr. 3.3.3.2** Usporiadanie zaťažovania skúšobného telesa (zaťažovanie jedným bremenom uprostred)
- Obr. 3.5.3.1** Príklad usporiadanie skúšky (hlbka priesaku tlakovou vodou)
- Obr. 3.5.3.2** Schéma metódy ISAT
- Obr. 3.5.3.3** Torrent permeability tester
- Obr. 3.5.3.4** German water permeation test
- Obr. 3.5.4.1** Presakovanie vlhkosti škrupinou chladiacej veže, kde na vonkajšom povrchu vznikajú výkvet
- Obr. 3.5.4.2** Karbonatácia betónu
- Obr. 3.6.1** Odvrtanie jadra pri tečúcej vode
- Obr. 3.6.2** Náčrt skúšobného telesa a znázornenie polohy kruhových terčov

- Obr. 3.6.3** Skúšobné zariadenie pre odtrhovú skúšku DYNA Z15
- Obr. 3.6.4** Meranie priemerov plochy porušenia na skúšobnej vzorke
- Obr. 4.3.1** Modifikácia umiestnenia návrtovej skúšky na skúšobných vzorkách
- Obr. 4.3.2** Lepenie terčov, samotný priebeh odtrhu

8.2 Zoznam tabuliek

- Tab. 3.1** Hodnotenie kvality krycej vrstvy podľa k_T
- Tab. 4.1** Receptúry skúšaných betónov
- Tab. 4.2** Vlastnosti skúšaných betónov
- Tab. 4.3** Priemerná pevnosť v ťahu povrchových vrstiev

8.3 Zoznam grafov

- Graf 3.1** Hmotnostný podiel jednotlivých zložiek betónu
- Graf 4.1** Priemerná pevnosť v ťahu povrchových vrstiev
- Graf 4.2** Závislosť vodného súčiniteľa na pevnosti v ťahu povrchovej vrstvy
- Graf 4.3** Závislosť pevnosti v tlaku na pevnosti v ťahu povrchových vrstiev
- Graf 4.4** Závislosť pevnosti v ťahu ohybom na pevnosti v ťahu povrchových vrstiev
- Graf 4.5** Znázornenie percentuálneho poklesu všetkých sledovaných veličín vzhľadom k hodnotám nameraným na receptúre s označením 0/1
- Graf 4.6** Závislosť k_T na vodnom súčiniteli
- Graf 4.7** Závislosť pevnosti v ťahu ohybom na pevnosti v prostom ťahu

8.4 Zoznam vzorcov

- 1 Objemová hmotnosť
- 2 Veľkosť dĺžkovej zmeny betónu pri zmene teploty
- 3 Pevnosť v prostom ťahu

- 4 Pevnosť v priečnom ťahu na valcových skúšobných telesách
- 5 Pevnosť v priečnom ťahu na kockových skúšobných telesách
- 6 Pevnosť v priečnom ťahu na hranolových skúšobných telesách
- 7 Pevnosť v ťahu za ohybu pri zaťažovaní dvoma bremenami
- 8 Pevnosť v ťahu za ohybu pri zaťažovaní jedným bremenom v strede
- 9 Vodný súčiniteľ
- 10 Pevnosť v ťahu povrchovej vrstvy

8.5 Zoznam príloh

Príloha 1: Meranie vlastností čerstvého betónu

Príloha 2: Tabelárne vyhodnotenie

Príloha 3: Skúšobné telesá po porušení

PRÍLOHY

Príloha 1: Meranie vlastností čerstvého betónu



Obr. P1.1 Meranie sadnutia kužel'a



Obr. P1.2 Meranie rozliatia



Obr. P1.3 Meranie objemovej hmotnosti čerstvého betónu



Obr. P1.4 Meranie obsahu vzduchu v čerstvom betóne

Príloha 2: Tabelárne vyhodnotenie

Tab. P2.1 Jednotlivé výsledky na vzorke R

Označenie skúšobného miesta na vzorke R	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	5,4	50,3	2,7	A
2	6,0	50,6	3,0	A
3	6,1	50,1	3,1	A
4	5,7	50,8	2,8	A
5	3,2	50,3	1,6	A/Y (80/20)
6	3,4	50,4	1,7	A/Y (70/30)
7	4,0	50,4	2,0	A
8	6,3	50,7	3,1	A
9	6,0	50,4	3,0	A

Tab. P2.2 Jednotlivé výsledky na vzorke 0/1

Označenie skúšobného miesta na vzorke 0/1	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	3,5	50,6	1,7	A
2	3,3	51,5	1,6	A
3	4,0	52,1	1,9	A
4	2,6	51,0	1,3	A
5	3,1	50,7	1,5	A
6	3,9	52,5	1,8	A
7	3,7	50,8	1,8	A
8	3,5	51,5	1,7	A
9	3,2	47,0	1,8	A/Y (90/10)

Tab. P2.3 Jednotlivé výsledky na vzorke 0/2

Označenie skúšobného miesta na vzorke 0/2	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	4,3	48,5	2,3	A
2	4,1	48,6	2,2	A
3	3,7	48,6	2,0	A
4	3,1	48,6	1,7	A
5	4,1	48,5	2,2	A
6	3,4	48,4	1,8	A
7	3,8	48,6	2,0	A
8	4,6	48,2	2,5	A/Y (40/60)
9	4,3	48,5	2,3	A/Y (90/10)

Tab. P2.4 Jednotlivé výsledky na vzorke 0/3

Označenie skúšobného miesta na vzorke 0/3	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	8,3	49,6	4,3	A
2	8,3	50,1	4,2	A
3	7,8	50,0	4,0	A
4	8,0	50,4	4,0	A
5	8,6	50,1	4,4	A
6	6,8	48,8	3,6	A/Y (90/10)
7	8,7	49,9	4,4	A
8	8,8	50,6	4,4	A
9	6,8	51,0	3,3	A

Tab. P2.5 Jednotlivé výsledky na vzorke 1/1

Označenie skúšobného miesta na vzorke 1/1	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	7,5	48,5	4,0	A
2	8,4	50,0	4,3	A
3	7,4	50,9	3,6	A
4	8,1	51,7	3,9	A
5	7,5	51,5	3,6	A
6	6,2	51,6	2,9	A
7	8,0	51,7	3,8	A
8	7,7	51,0	3,7	A
9	7,7	51,5	3,7	A

Tab. P2.6 Jednotlivé výsledky na vzorke 1/2

Označenie skúšobného miesta na vzorke 1/2	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	8,3	51,5	4,0	A
2	6,7	51,6	3,2	A
3	7,7	50,9	3,8	A
4	7,7	51,7	3,6	A
5	7,2	51,2	3,5	A
6	7,2	51,6	3,4	A
7	8,3	51,6	3,9	A
8	7,4	51,0	3,6	A
9	6,7	51,5	3,2	A

Tab. P2.7 Jednotlivé výsledky na vzorke 1/3

Označenie skúšobného miesta na vzorke 1/3	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	7,8	50,1	4,0	A
2	8,2	49,6	4,2	A
3	6,6	50,1	3,3	A
4	7,8	50,3	3,9	A
5	8,3	49,8	4,3	A
6	7,2	50,0	3,7	A
7	8,3	50,0	4,2	A
8	5,4	49,9	2,8	A
9	6,3	49,9	3,2	A

Tab. P2.8 Jednotlivé výsledky na vzorke 2/2

Označenie skúšobného miesta na vzorke 2/2	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	7,1	51,2	3,4	A
2	6,5	50,9	3,2	A
3	7,0	51,2	3,4	A
4	6,8	51,1	3,3	A
5	7,0	51,2	3,4	A
6	6,6	51,0	3,2	A
7	8,5	50,7	4,2	A
8	7,3	50,8	3,6	A
9	8,2	50,6	4,1	A

Tab. P2.9 Jednotlivé výsledky na vzorke 2/3

Označenie skúšobného miesta na vzorke 2/3	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	8,4	50,2	4,2	A
2	8,9	50,2	4,5	A
3	9,1	50,3	4,6	A
4	8,2	50,3	4,1	A
5	8,7	50,4	4,4	A
6	8,7	50,3	4,4	A
7	7,5	50,4	3,8	A
8	8,9	50,6	4,4	A
9	6,7	50,5	3,3	A

Tab. P2.10 Jednotlivé výsledky na vzorke P2/2

Označenie skúšobného miesta na vzorke P2/2	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	9,4	50,4	4,7	A
2	9,0	50,8	4,4	A
3	8,3	50,5	4,1	A
4	7,7	50,7	3,8	A
5	8,9	49,8	4,5	A
6	10,5	49,5	5,4	A
7	9,0	50,4	4,5	A
8	8,4	50,7	4,2	A
9	9,3	50,2	4,7	A

Tab. P2.11 Jednotlivé výsledky na vzorke P2/3

Označenie skúšobného miesta na vzorke 2/3	Sila pri porušení F [kN]	Stredný priemer plochy porušenia D [mm]	Výsledná pevnosť v ťahu Rt [MPa]	Typ plochy porušenia [%]
1	8,4	50,2	4,2	A
2	8,9	50,2	4,5	A
3	9,1	50,3	4,6	A
4	8,2	50,3	4,1	A
5	8,7	50,4	4,4	A
6	8,7	50,3	4,4	A
7	7,5	50,4	3,8	A
8	8,9	50,6	4,4	A
9	6,7	50,5	3,3	A

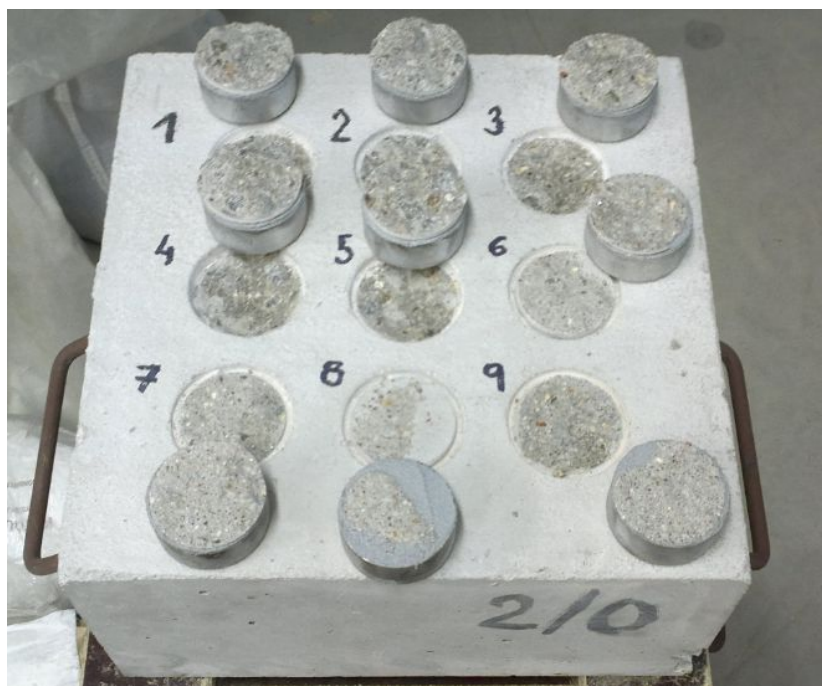
Príloha 3: Skúšobné telesá po porušení



Obr. P3.1 Teleso z betónu R po odskúšaní



Obr. P3.2 Teleso z betónu 0/1 po odskúšaní



Obr. P3.3 Teleso z betónu 0/2 po odskúšaní



Obr. P3.4 Teleso z betónu 0/3 po odskúšaní



Obr. P3.5 Teleso z betónu 1/1 po odskúšaní



Obr. P3.6 Teleso z betónu 1/2 po odskúšaní



Obr. P3.7 Teleso z betónu 1/3 po odskúšaní



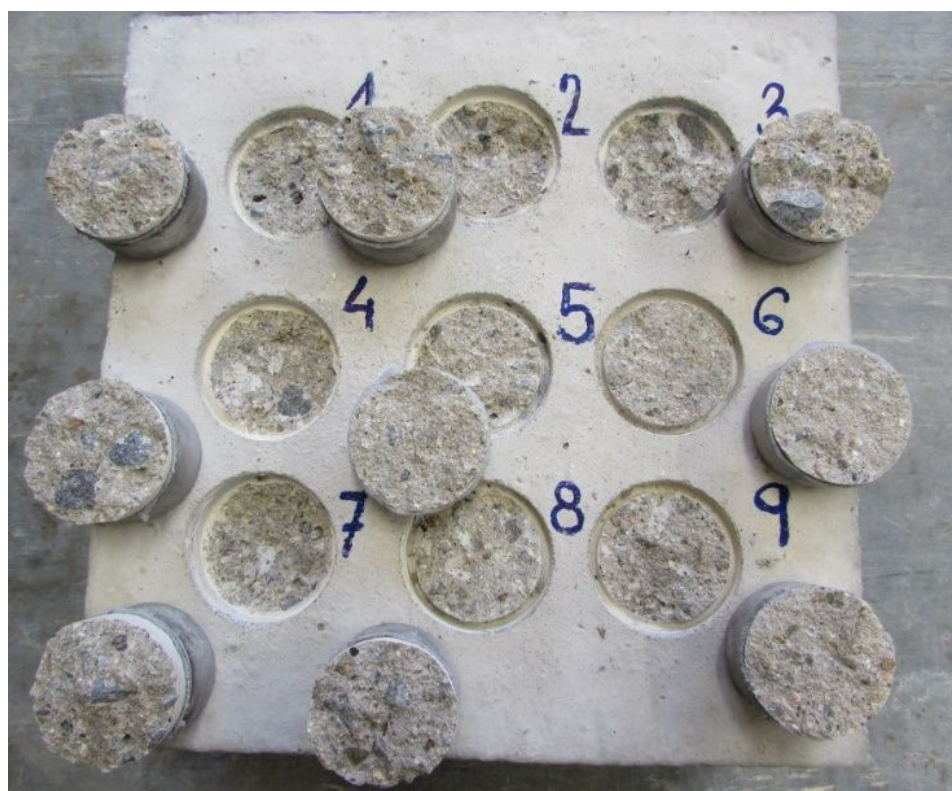
Obr. P3.8 Teleso z betónu 2/2 po odskúšaní



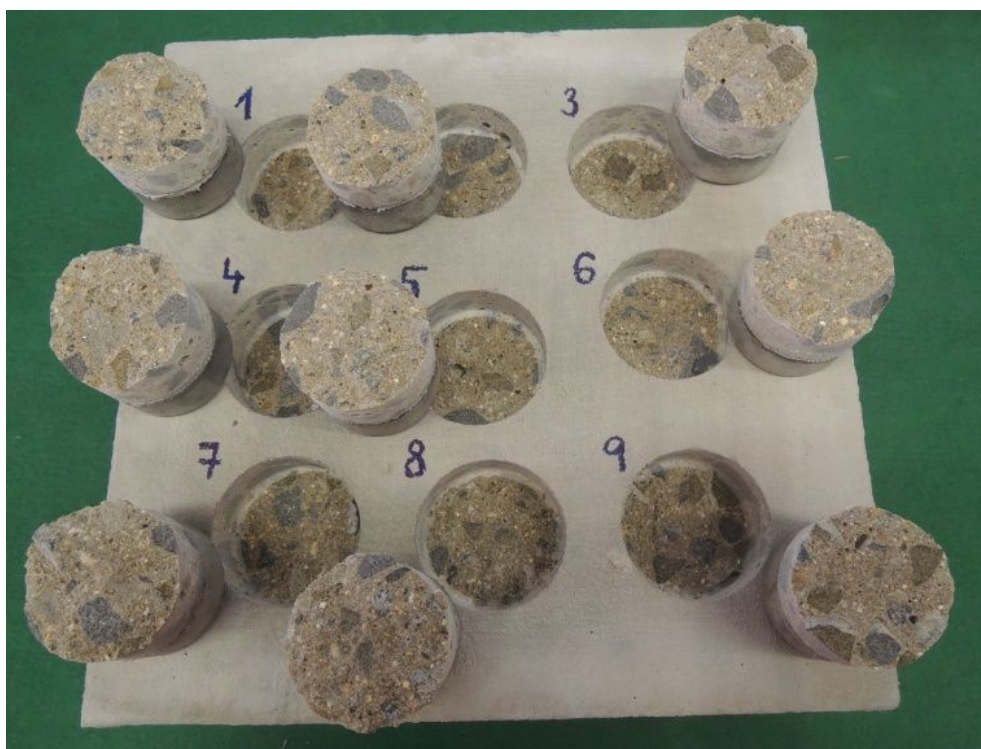
Obr. P3.9 Teleso z betónu 2/2 po odskúšaní – detail skúšobného miesta 7 a 3 na betóne 2/2



Obr. P3.10 Teleso z betónu 2/3 po odskúšaní



Obr. P3.11 Teleso z betónu P2/2 po odskúšaní



Obr. P3.12 Teleso z betónu P2/3 po odskúšaní